



SKRIPSI - ME 141501

ANALISIS STABILITAS TEGANGAN PADA SISTEM KELISTRIKAN DI KAPAL GENERAL CARGO

EDO LEGOWO
NRP 4213 100 075

Dosen Pembimbing

Indra Ranu Kusuma, S.T., M.Sc.

DEPARTEMEN TEKNIK SISTEM PERKAPALAN
Fakultas Teknologi Kelautan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017

Halaman ini sengaja dikosongkan



FINAL PROJECT - ME 141501

VOLTAGE STABILITY ANALYSIS ON GENERAL CARGO SHIP ELECTRICAL SYSTEM

EDO LEGOWO
NRP 4213 100 075

Supervisors

Indra Ranu Kusuma, S.T., M.Sc.

DEPARTMENT OF MARINE ENGINEERING
Faculty of Marine Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017

Halaman ini sengaja dikosongkan

LEMBAR PENGESAHAN

ANALISIS STABILITAS TEGANGAN PADA SISTEM KELISTRIKAN DI KAPAL GENERAL CARGO

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada

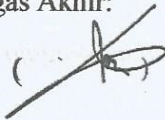
Bidang Studi *Marine Electrical and Automatical System* (MEAS)
Program Studi S-1 Departemen Teknik Sistem Perkapalan
Fakultas Teknologi Kelautan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

Edo Legowo
NRP 4213 100 075

Disetujui oleh Pembimbing Tugas Akhir:

Indra Ranu Kusuma, S.T., M.Sc.



SURABAYA
Juli, 2017

Halaman ini sengaja dikosongkan

LEMBAR PENGESAHAN

ANALISIS STABILITAS TEGANGAN PADA SISTEM KELISTRIKAN DI KAPAL GENERAL CARGO

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada

Bidang Studi *Marine Electrical and Automatical System* (MEAS)
Program Studi S-1 Departemen Teknik Sistem Perkapalan
Fakultas Teknologi Kelautan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

Edo Legowo
NRP 4213 100 075

Disetujui oleh Kepala Departemen Teknik Sistem Perkapalan:



Dr. Eng. M. Badrus Zaman, S.T., M.T.
NIP. 1977/0802 2008 01 1007

Halaman ini sengaja dikosongkan

ABSTRAK

Nama Mahasiswa : Edo Legowo
NRP : 42 13 100 075
Departemen : Teknik Sistem Perkapalan
Dosen Pembimbing : Indra Ranu Kusuma, S.T., M.Sc.

Stabilitas tegangan mencerminkan kemampuan sistem menjaga nilai tegangannya pada kondisi normal ataupun setelah terjadi gangguan. Selain disebabkan oleh gangguan, penambahan beban dan perubahan konfigurasi sistem juga dapat mempengaruhi stabilitas tegangan sistem kelistrikan di kapal. Ketidakstabilan tegangan terjadi ketika nilai tegangan pada sisi penerima akan turun dari batas normalnya, dan hal tersebut dapat menuntun pada kondisi yang dinamakan *voltage collapse*.

Tegangan akan turun pada titik terendah, sehingga dapat menimbulkan terjadinya *black out* sistem secara keseluruhan ataupun parsial. Proses pembangkitan tenaga listrik di kapal yang dilakukan oleh generator dipengaruhi oleh perubahan kebutuhan daya reaktif pada beban. Adanya perubahan daya reaktif yang terjadi sangat mempengaruhi kestabilan dari tegangan keluaran terminal yang dihasilkan oleh generator. Tegangan keluaran tersebut harus diatur agar generator tetap dalam keadaan stabil saat mengkompensasi kebutuhan daya reaktif dari beban.

Kestabilan transien merupakan kemampuan sistem tenaga listrik untuk mempertahankan sinkronisasi dan keseimbangan daya pembangkitan dengan daya pembebanan dalam sistem. Dalam keadaan ini, semua generator pada sistem kelistrikan di kapal berputar pada kecepatan sinkron. Gangguan-gangguan besar yang mungkin terjadi secara tiba-tiba seperti lepasnya pembangkit, *starting motor* daya besar, dan hubung singkat mampu mengakibatkan percepatan ataupun perlambatan putaran rotor sehingga hilangnya sinkronisasi dapat terjadi pada sistem kelistrikan.

Integrasi pada sistem kelistrikan di kapal menggunakan sistem distribusi ring memiliki kelebihan yaitu penyaluran daya listrik yang dapat disuplai melalui dua generator atau lebih. Respon kestabilan sistem kelistrikan di kapal dilakukan untuk mengetahui respon sistem akibat adanya gangguan secara tiba-tiba sehingga rekomendasi kestabilan yang handal dapat ditentukan.

Kata Kunci : Kestabilan Transien, Sistem Kelistrikan Kapal, Kapal *General Cargo*.

Halaman ini sengaja dikosongkan

ABSTRACT

Name : Edo Legowo
NRP : 42 13 100 075
Department : Marine Engineering
Supervisors : Indra Ranu Kusuma, S.T., M.Sc.

Voltage stability defines the capabilities of the system in maintaining its voltage values under normal condition or after the occurring interference. Besides the interference reasons, the load addition and the change of the system configuration, could also affect the voltage system stability on the vessels. Voltage instability occurs when the voltage values at the receiver goes down from its normal state level, while this leads to what we called voltage collapse.

Voltage values will fall to its lowest point, so that can cause the black out of the system as a whole or partially. The process of generating electricity in the vessels by using generators is influenced by the change of reactive power at the load. The existence of those changes will greatly affects the terminal voltage stability, generated by those generators. The output voltage needs to be adjusted so the generator remains stable while compensating the requirements of the reactive power from the loads.

Transient stability is an ability of electrical system to maintain the synchronization and balance of generating power with loading power in the system. In this case, every generators in ship electrical system will rotate in a certain speed. Major problems that may occur suddenly, such as the outage the generator, high power starting motor, and short circuit, are capable to slowdown or even accelerate the motor rotation that make loss of synchronization may occur in the electrical power system.

Ring distribution is used as the integrated electrical power system in ships, as it has the benefit of allowing the system to supply electrical powers through two or more generators. The electrical power stability response in ship is done to determine the system response due to some sudden occurring problems so the reliable recommendations can be selected.

Keywords: *Ship electrical system, Voltage stability, General cargo ship.*

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, yang selalu melimpahkan rahmatNya sehingga penulis dapat menyelesaikan penulisan tugas akhir dengan judul “Analisis Stabilitas Tegangan Pada Sistem Kelistrikan Di Kapal General Cargo”. Skripsi ini diajukan sebagai salah satu persyaratan kelulusan program sarjana strata 1 Jurusan Teknik Sistem Perkapalan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Dalam penyusunan tugas akhir ini penulis telah mendapatkan bantuan dari berbagai pihak. Untuk itu, dalam kesempatan ini penulis ingin mengucapkan rasa terima kasih kepada:

1. Orang tua penulis, Bapak Bawadi dan Ibu Iis yang selalu mendoakan serta memberi dukungan dan semangat.
2. Bapak Indra Ranu Kusuma, S.T., M.Sc. selaku Dosen Pembimbing Tugas Akhir saya yang telah memberi ilmu serta motivasi selama proses pengerjaan.
3. Bapak Dr.Eng Muhammad Badrus Zaman, S.T, M.T selaku Dosen Wali yang telah memberi petunjuk, amanah dan nasehat layaknya orang tua sendiri selama 4 tahun ini sehingga dapat menyelesaikan semua perkuliahan dengan baik.
4. Seluruh Bapak dan Ibu dosen yang telah mengajarkan banyak ilmu selama penulis menempuh pendidikan di Jurusan Teknik Sistem Perkapalan.
5. Seluruh grader dan teman-teman yang mengambil skripsi di Laboratorium *Marine Electrical and Autonomatical System*, serta rekan-rekan Barakuda'13 yang selalu memberi dukungan.
6. Seluruh pihak yang tidak bisa disebutkan satu per satu, yang telah memberikan dukungan dan bantuan dalam pengerjaan tugas akhir ini.

Penulis menyadari bahwa tugas akhir ini jauh dari kesempurnaan, oleh karena itu saran sangat dibutuhkan untuk memperbaiki penyusunan tugas akhir ini. Akhir kata, semoga tulisan ini dapat memberikan manfaat bagi pembaca dan rekan mahasiswa.

Surabaya, Juli 2017

Penulis

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	vii
ABSTRAK.....	ix
ABSTRACT.....	xi
KATA PENGANTAR.....	xiii
DAFTAR ISI.....	xv
DAFTAR TABEL.....	xvii
DAFTAR GAMBAR.....	xix
<i>Halaman ini sengaja dikosongkan.....</i>	1
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	2
1.3 Batasan Masalah.....	2
1.4 Tujuan Skripsi	2
1.5 Manfaat.....	2
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	3
2.1 Sistem Kelistikan di Kapal.....	3
2.2 Generator	5
2.2.1 Beban Kerja (<i>Load Factor</i>) Generator Kapal	7
2.2.2 Faktor Kesamarataan (<i>Diversity Factor</i>) Generator Kapal	7
2.2.3 Daya Reaktif Generator.....	8
2. 2.4 Kendali Generator	8
2.3 Stabilitas Sistem Tenaga Listrik.....	8
2.3.1 Jaringan Distribusi Ring.....	9
2.4 Definisi Kestabilan Transien.....	10
2.4.1 Stabilitas Sudut Rotor.....	13
2.4.2 Stabilitas Frekuensi	13
2.4.3 Stabilitas Tegangan	13
2.4 Standar Batas Operasi Tegangan.....	14

2.5 Pemodelan Electrical Transient Analysis Program.....	14
2.6 Analisa Kestabilan Kondisi Transient.....	16
BAB III METODOLOGI.....	17
3.1 Perumusan Masalah	18
3.2 Studi Literatur	18
3.3 Pengumpulan Data	18
3.4 Pemodelan Rangkaian.....	22
3.5 Analisis Stabilitas Tegangan Pemodelan dan Hasil Data	25
3.6 Kesimpulan dan Saran	25
BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN.....	27
4.1 Gambaran Umum.....	27
4.2 Perencanaan Studi Kasus kapal General Cargo	27
4.2 Simulasi Kestabilan Transien	29
4.3.1 Simulasi Kestabilan Transien Generator Lepas/ <i>Generator Outage</i>	29
4.3.1.1 Cargo Handling = terjadi 1Gen. <i>OFF</i> , 1 generator lepas dari sistem ($t=2s$).....	29
4.3.1.2 Cargo Handling = 2 Gen. <i>OFF</i> , 2 generator lepas dari sistem ($t=2s$ & $3s$) 30	
4.3.1.3 Cargo Handling = terjadi 1Gen. <i>OFF</i> + LS1 : 1 generator lepas dari sistem ($t=1s$) + <i>load shedding 1</i> (LS1)	31
4.3.2 Simulasi Kestabilan Transien <i>Starting Motor</i>	32
4.3.2.1 MS1 : 1 motor berputar ketika sistem beroperasi selama 3 detik ($t=3s$).....	32
4.3.2.2 MS1 : 2 motor berputar ketika sistem beroperasi selama 5 detik ($t=5s$).....	33_Toc488950480
BAB V.....	35
5.1 Kesimpulan	35
5.2 Saran.....	35
DAFTAR PUSTAKA.....	37
BIOGRAFI PENULIS	39

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Standar variasi tegangan dan frekuensi sistem distribusi AC.....	14
Tabel 2.2 Standar variasi tegangan sistem distribusi DC	14
Tabel 3.1 Spesifikasi Cargo Crane kapal KM. Mhar	20
Tabel 3.2 Spesifikasi Generator.....	21
Tabel 3.3 Peralatan Sistem Kelistrikan Kapal.....	22
Tabel 3.4 Perencanaan Studi Kasus	26

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1 Sistem distribusi daya listrik di kapal.....	1
Gambar 2.1. Sistem pembagian daya listrik di kapal.....	4
Gambar 2.2. Generator.....	6
Gambar 2.3. Respon Voltase generator/AVR.....	8
Gambar 2.4. Jaringan distribusi Loop.....	9
Gambar 2.5. Garis besar sistem tenaga listrik.....	10
Gambar 2.6. Perilaku generator saat terjadi gangguan.....	11
Gambar 2.7. Klasifikasi stabilitas sistem tenaga listrik.....	13
Gambar 2.8. Tampilan Electrical Transient Analysis Program.....	15
Gambar 3.1. Flowchart pengerjaan.....	18
Gambar 3.2. General Arrangement kapal KM. Mhar.....	19
Gambar 3.3. Cargo Crane kapal KM. Mhar.....	22
Gambar 3.4. single-line diagram.....	23
Gambar 3.5. Single-line Diagram pada Software ETAP.....	23
Gambar 3.6. Bus Fuel System.....	24
Gambar 3.7. Bus Lo System.....	24
Gambar 3.8. Bus GS System.....	24
Gambar 3.9. Bus Main Deck.....	25
Gambar 3.10. Bus Poop Deck.....	25
Gambar 3.11. Bus ESB.....	25
Gambar 4.1. Respon tegangan ketika generator3 lepas dari sistem.....	30
Gambar 4.2. Respon tegangan ketika generator2 dan 3 lepas dari sistem.....	31
Gambar 4.3. Respon tegangan ketika generator 3 lepas dari sistem + pelepasan beban.....	32
Gambar 4.4. Respon tegangan ketika motor Cargo Crane1 Start dari sistem.....	33
Gambar 4.5. Gambar 4.5 Respon tegangan ketika motor Cargo Crane 1 dan 2 Start dari sistem.....	34

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB I

PENDAHULUAN

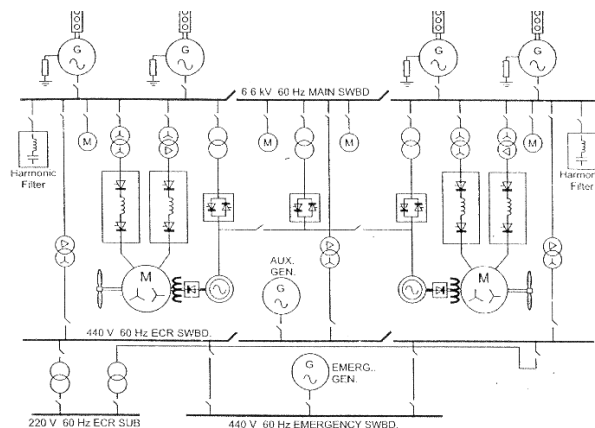
1.1 Latar Belakang

Dalam pembangkitan tenaga listrik di kapal, kestabilan tegangan merupakan hal yang sangat diperhatikan karena dapat mempengaruhi sistem tegangan. Ketidakstabilan tegangan akan menyebabkan ketidakstabilan sistem tenaga secara keseluruhan, terutama kualitas dan kemampuan pengiriman daya untuk beroperasinya peralatan pada sebuah kapal, kondisi terparah terjadi mekanisme pelepasan beban.

Proses pembangkitan tenaga listrik yang dilakukan oleh generator dipengaruhi oleh perubahan kebutuhan daya reaktif pada beban. Adanya perubahan daya reaktif yang terjadi sangat mempengaruhi kestabilan dari tegangan keluaran terminal yang dihasilkan oleh generator. Tegangan keluaran tersebut harus diatur agar generator tetap dalam keadaan stabil saat mengkompensasi kebutuhan daya reaktif dari beban.

Stabilitas tegangan mencerminkan kemampuan sistem menjaga nilai tegangannya pada kondisi normal ataupun setelah terjadi gangguan. Selain disebabkan oleh gangguan, penambahan beban dan perubahan konfigurasi sistem juga dapat mempengaruhi stabilitas tegangan sistem tenaga listrik. Ketidakstabilan tegangan terjadi ketika nilai tegangan pada sisi penerima akan turun dari batas normalnya, dan hal tersebut dapat menuntun pada kondisi yang dinamakan *voltage collapse*. Tegangan akan turun pada titik terendah, sehingga dapat menimbulkan terjadinya *black out* sistem secara keseluruhan ataupun parsial.

Analisis stabilitas tegangan dilakukan pada sistem distribusi daya listrik di kapal yang merupakan salah satu sistem yang sangat penting seperti gambar 1.1. pada gambar tersebut terdapat empat generator yang dibebani oleh setiap komponen peralatan-peralatan listrik pada kapal. Sistem pembebanan dari generator atau biasa disebut *single-line diagram* dimodelkan dengan menggunakan Electrical Transient Analysis Program.



Gambar 1.1 Sistem distribusi daya listrik di kapal
(Sumber: "Practical Marine Electrical Knowledge" book)

1.2 Perumusan Masalah

Masalah – masalah yang harus diselesaikan dalam penelitian ini dirumuskan sebagai berikut:

1. Bagaimana desain sistem distribusi daya pada sistem kelistrikan di kapal?
2. Bagaimana nilai stabilitas tegangan pada sistem kelistrikan di kapal jika terjadi gangguan pada rangkaian?
3. Bagaimana skema untuk menstabiliskan tegangan pada sistem jika terjadi gangguan pada rangkaian ?

1.3 Batasan Masalah

1. Data peralatan dan komponen kapal yang digunakan adalah rancangan kapal General Cargo KM. Mhar
2. Simulasi menggunakan *Electrical Transient Analysis Program* yang dilakukan dengan menampilkan kondisi sistem dalam keadaan bongkar muat/*Cargo Handling*.
3. Hanya menganalisa karakteristik tegangan dari output generator pada *single-line diagram* yang dimodelkan *Electrical Transient Analysis Program*

1.4 Tujuan Skripsi

1. Mengetahui desain sistem distribusi daya di kapal menggunakan *Electrical Transient Analysis Program*.
2. Mengidentifikasi nilai stabilitas tegangan transient pada sistem kelistrikan di kapal.
3. Menganalisa skema tindakan pelepasan beban untuk menstabilkan tegangan.

1.5 Manfaat

Dari Penelitian ini diharapkan dapat bermanfaat untuk berbagai pihak. Adapun manfaat yang diperoleh antara lain:

1. Dapat mengamati tegangan pada sistem kelistrikan *single-line diagram* di kapal agar memiliki nilai yang lebih stabil
2. Sebagai penunjang untuk penelitian – penelitian selanjutnya mengenai Analisis stabilitas tegangan di kapal

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem Kelistikan di Kapal

Instalasi listrik kapal atau sistem distribusi daya listrik di atas kapal merupakan salah satu instalasi yang sangat penting untuk mengoptimalkan kinerja operasional kapal itu sendiri. Instalasi tersebut dimulai dari unit pembangkit listrik yang berupa generator yang kemudian akan melalui berbagai macam komponen sistem distribusi. Perancangan instalasi listrik kapal ini tentu harus berdasarkan pada persyaratan atau ketentuan yang berlaku untuk sistem di kapal. Pemilihan generator yang sesuai dengan kebutuhan harus melewati beberapa tahap sampai akhirnya ditemukan tipe mesin yang cocok dipasang di kapal. Tahap tersebut antara lain perhitungan daya yang dibutuhkan di atas kapal, penentuan type dan ukuran yang sesuai dengan kondisi ruang yang akan ditempati.

Energi untuk daya Sistem kelistrikan suatu kapal biasanya disuplai oleh 2 atau lebih generator. Selain itu juga dapat disuplai dari *emergency* generator atau dari *battery* (aki). Daya listrik keluaran dari generator ini biasanya semuanya akan dipusatkan menuju ke satu *Main Switch Board* (MSB). Biasanya, *emergency switchboard* dan sistem *emergency distribution* dayanya terhubung dengan *bus tie* dari *switchboard* di kapal. Jika sistem pelayanan daya di kapal mengalami kegagalan/kerusakan, sistem *emergency distribution* akan secara otomatis berpindah dari pelayanan normal ke pelayanan *Emergency Generator*. Ada banyak disain yang berbeda untuk distribusi daya pada instalasi beban listrik di kapal tergantung type kapalnya.

Pada kapal yang besar, 2 atau 3 sub distribusi atau *load center switchboard* harus tersedia untuk distribusi daya dan sistem penerangan. Secara umum satu switchboard terletak pada bagian belakang kapal, satu pada bagian depan dan jika memungkinkan yang ketiga diletakkan pada bagian tengah kapal. Tiap bagian *switchboard* pusat daya disuplai dari *switchboard* layanan kapal dengan menggunakan *Bus feeder*. Disain ini lebih ekonomis dari pada memberikan banyak jalur yang panjang dari switchboard layanan kapal ke seluruh bagian kapal. Masing-masing *switchboard* diletakkan/dipasang pada ruangan yang sesuai. Kompartemen ini biasanya juga bertindak sebagai pusat untuk pelayanan kebutuhan listrik dan perawatan serta masing-masing mungkin juga menyediakan meja kerja dan locker untuk komponen peralatan lampu sekring dan kebutuhan listrik lainnya.

Selanjutnya daya listrik atau arus listrik keluaran dari MSB dibagi dalam beban-beban yang terdiri dari tiga kelompok besar :

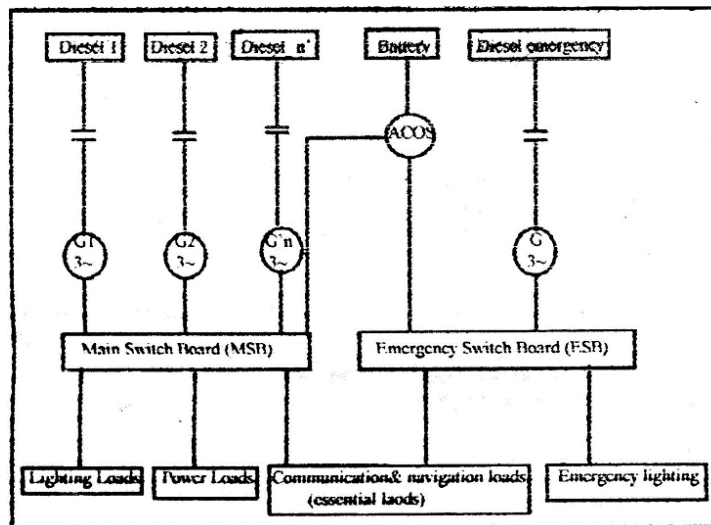
- **Beban penerangan;** semua beban pada kelompok ini mempunyai tegangan 220 V satu phase dengan frekwensi 50 Hz. Kebanyakan beban ini berupa penerangan pada gang-gang, ruangan-ruangan tertutup, ruangan terbuka dan socket keluaran untuk peralatan untuk peralatan-peralatan power yang relatif rendah.
- **Beban daya;** semua beban pada kelompok ini mempunyai tegangan 220 V/380 V tiga phase dengan frekwensi 50 Hz. Kebanyakan beban pada kelompok ini adalah peralatan berupa mesin pompa (ballast, bilga, FW, dan

lain-lain), mesin angkat (crane, jangkar, dan lain-lain), refrigerator dan sistem air condition (AC).

- **Beban komunikasi dan navigasi;** terdiri dari peralatan navigasi bertegangan 220 V dengan frekwensi 50 Hz. Beban-bekan instrumentasi pada tegangan 36 V DC/ 24 V DC yang diambil dari rectifier dan di back up oleh battery melalui UPS.

Suplai utama dari output generator mempunyai tegangan *line* 390 V atau tegangan phase 225 V pada frekwensi 50 Hz. Kabel transmisi akan menimbulkan drop tegangan dan ini harus tidak boleh lebih dari 3 % menurut rule BKI. Jadi tegangan pada tiap terminal dari beban-bekan adalah 380 V (line voltage) / 220 V (tegangan phase) pada frekwensi 50 Hz.

Pelayanan sistem beban daya secara prinsip terdiri dari motor penggerak peralatan bantu dan peralatan pemanas yang tersedia baik secara tersendiri atau dalam kelompok oleh *feeder* dari layanan switchboard distribusi. *Feeder* normalnya digunakan untuk sumber daya peralatan bantu sistem propulsi yang besar. Dan diletakkan pada ruangan yang sama dengan switchboard distribusi. Tapi mungkin digunakan untuk motor yang besar pada salah satu tempat di kapal. Kelompok beban disuplai oleh *feeder* melalui panel distribusi. Panel ini menjadi pusat tempat penyuplaian beban. Seperti pada gambar 2.1 dapat dilihat diagram distribusi daya di kapal.



Gambar 2.1 Sistem pembagian daya listrik di kapal
(Sumber: "Marine Engineering" book)

Sistem pembangkit listrik arus bolak-balik (Generator Arus AC) menjadi standar bagi kebanyakan instalasi listrik di kapal. Pemilihan sistem dengan arus bolak balik memiliki keuntungan yang signifikan daripada menggunakan sistem dengan arus searah (Arus DC). Keuntungan tersebut adalah :

- Penghematan dalam biaya, berat peralatan dan kebutuhan ruang.
- Pemeliharaan yang rendah
- Ketersediaan peralatan yang tinggi

- Keandalan yang tinggi

Pada kapal-kapal baru, sistem distribusi DC saat ini jarang digunakan karena untuk semua sistem, sistem AC lebih mudah dan murah dibandingkan sistem DC. Dimana sistem AC lebih simple, ringan dan mudah dalam perawatan. Sistem kawat kabel tunggal dengan Hull Return sekarang ini jarang digunakan. Dan berdasarkan SOLAS 1960, tindakan pencegahan harus dilakukan dan sesuai dengan peraturan yang berlaku. Kelemahan dari sistem kawat tunggal dalam kaitannya dengan keselamatan apabila dilakukan isolasi terhadap kabel tidak dapat menjadi indikator untuk kondisi underload. Dan jika dilakukan survey terhadap kondisi sirkuit ke kebutuhan peralatan tidak dapat dilakukan pengujian Megger tanpa membuka lampu atau alat pemutus hubungan/stop kontak (Circuit breaker).

Distribusi AC sistem 3 phase dengan isolasi netral adalah yang biasa digunakan. Untuk sistem tegangan menengah 440 V biasanya lebih disukai digunakan dibandingkan 380 V karena tegangan 440 V dapat menghasilkan penghematan secara ekonomis yaitu ukuran kawat tembaga yang lebih kecil. Tetapi distribusi pada 415 V kadang-kadang digunakan pada saat kebutuhan beban kapal yang besar, dimana memerlukan jaringan ke tegangan netral 240 V dan standar tertentu terhadap peralatan yang digunakan. Sehingga sistem akan menggunakan kabel 4 kawat dengan netral earthed tetapi tanpa *Hull Return*. Sedangkan untuk sistem 380 V yang banyak digunakan di eropa daratan. Pada 3,3 kV sistem kabel 3 kawat dengan netral *earthed* melalui sebuah resistor. Tetapi ada kalanya seorang perancang lebih suka mengisolasi dengan sistem netral seperti pada tegangan menengah.

2.2 Generator

Generator kapal sebagai permesinan di kapal yang berfungsi untuk menyuplai kebutuhan energi listrik semua peralatan diatas kapal. Penentuan kapasitas generator dipengaruhi oleh load factor (faktor beban) peralatan. Load factor untuk tiap peralatan diatas kapal tidak sama. Hal ini tergantung pada jenis kapal dan daerah pelayarannya seperti : faktor medan yang fluktuatif (rute pelayaran), dan kondisi beban yang berubah-ubah serta periode waktu pemakaian yang tidak tentu atau tidak sama. Penentuan kapasitas generator harus mendukung pengoperasian diatas kapal. Walaupun pada beberapa kondisi kapal terdapat selisih yang cukup besar dan ini mengakibatkan efisiensi generator (load factor generator) berkurang yang pada akhirnya mempengaruhi biaya produksi listrik per kwh.

Fungsi utama generator diatas kapal adalah untuk menyuplai kebutuhan daya listrik di kapal. Daya listrik digunakan untuk menggerakkan motor-motor dari peralatan bantu pada kamar mesin dan mesin-mesin geladak, lampu penerangan, sistem komunikasi dan navigasi, pengkondisian udara (AC) dan ventilasi, perlengkapan dapur (*galley*), sistem sanitari, *cold storage*, alarm dan sistem kebakaran, dan peralatan lainnya.

Prinsip kerja dari generator yaitu rotor diputar maka belitan kawatnya akan memotong gaya-gaya magnet pada kutub-kutub magnetnya sehingga menimbulkan perbedaan tegangan dan menghasilkan arus listrik. Generator adalah alat bantu di kapal yang berfungsi untuk memenuhi kebutuhan listrik di kapal, dalam merencanakan sistem kelistrikannya perlu diperhatikan kebutuhan maksimum dan minimum daya rata-rata pada interval waktu tertentu selama periode kerja dari peralatan yang ada.

Generator kapal merupakan alat bantu kapal yang berguna untuk memenuhi kebutuhan listrik diatas kapal. Dalam penentuan kapasitas generator kapal yang akan digunakan untuk melayani kebutuhan listrik diatas kapal maka analisa beban dibuat untuk menentukan jumlah daya yang dibutuhkan dan variasi pemakaian untuk kondisi operasional seperti manuver, berlayar, berlabuh atau bersandar serta beberapa kondisi lainnya. Hal ini dimaksudkan untuk mengetahui daya minimum dan maksimum yang dibutuhkan.



Gambar 2.2 Generator
(Sumber : <http://www.miltoncat.com>)

Daya cadangan harus dimasukkan perhitungan untuk menutup kebutuhan daya listrik kapal pada puncak beban yang terjadi pada periode yang singkat, misalnya bila digunakan untuk mengasut motor – motor besar. Jika dilihat secara regulasi BKI mensyaratkan untuk daya keluar dari generator kapal sekurang-kurangnya diperlukan untuk pelayanan dilaut harus 15% lebih tinggi daripada kebutuhan daya listrik kapal yang ditetapkan dalam balans daya. Selain itu juga harus diperhatikan faktor pertumbuhan beban untuk masa akan datang. Untuk menentukan kapasitas generator di kapal dipergunakan suatu tabel balans daya yang mana seluruh peralatan listrik yang ada kapasitasnya atau dayanya tertera dalam tabel tersebut.

Sehingga dengan balans daya dapat diketahui daya listrik yang diperlukan untuk masing – masing kondisi operasional kapal. Dalam penentuan electric balans BKI Vol. IV (Bab I, D.I) mengisyaratkan bahwa :

1. Seluruh perlengkapan pemakaian daya yang secara tetap diperlukan untuk memelihara pelayanan normal harus diperhitungkan dengan daya kerja penuh.
2. Beban terhubung dari seluruh perlengkapan cadangan harus dinyatakan. Dalam hal perlengkapan pemakaian daya nyata yang hanya bekerja bila suatu perlengkapan serupa rusak, kebutuhan dayanya tidak perlu dimasukkan dalam perhitungan.
3. Daya masuk total harus ditentukan, dari seluruh pemakaian daya yang hanya untuk sementara dimasukkan, dikalikan dengan suatu faktor kesamaan waktu bersama (common simultaneity factor) dan ditambahkan kepada daya masuk total dari seluruh perlengkapan pemakaian daya yang terhubung tetap. Daya masuk total sebagaimana telah ditentukan sesuai 1 dan 3

4. Maupun daya yang diperlukan untuk instalasi pendingin yang mungkin ada, harus dipakai sebagai dasar dalam pemberian ukuran instalasi generator kapal.

Kebutuhan maximum penting diketahui untuk menentukan kapasitas generator yang diperlukan. Sedangkan kebutuhan minimum digunakan untuk menentukan konfigurasi dari sistem pembangkit listrik yang sesuai serta untuk menentukan kapan generator dioperasikan. Secara umum terdapat empat kelompok beban di kapal yang harus dilayani oleh generator berdasarkan fungsinya masing-masing :

- Beban yang terdapat pada geladak lambung (hull part)
- Beban yang berupa peralatan yang menunjang sistem pendinginan palka
- Beban berupa electromotor yang menunjang sistem permesinan kapal
- Beban berupa penerangan, peralatan komunikasi, navigasi, dan sistem tanda bahaya.

Berdasarkan aktifitas kapal terkait dengan peralatan-peralatan tersebut diatas dikelompokkan dalam lima kondisi, yaitu:

- | | |
|-----------------------|-----------------|
| 1) Persiapan berlayar | 4) Bongkar muat |
| 2) Berlayar | 5) Manuver |
| 3) Berlabuh | |

Pengelompokkan berdasarkan aktifitas kapal diatas bertujuan untuk memudahkan dalam penentuan faktor beban masing-masing peralatan, karena tidak semua peralatan listrik diatas bekerja secara kontinyu pada kondisi-kondisi pelayaran diatas.

Dalam penentuan beban digunakan perhitungan analisa beban listrik (electric load analisis) yang berupa table dan biasanya disebut juga dengan tabel kalkulasi keseimbangan beban listrik (calculation of electric power balance) (sarwito. S, 1993).

2.2.1 Beban Kerja (*Load Factor*) Generator Kapal

Load factor peralatan kapal adalah perbandingan waktu dan pemakaian peralatan yang dinyatakan dalam presentase. Untuk peralatan yang jarang digunakan dianggap mempunyai beban nol seperti *fire pump*, *anchor windlass*, *capstan* dan *boat winches*.

2.2.2 Faktor Kesamarataan (*Diversity Factor*) Generator Kapal

Peralatan listrik di kapal memiliki pembebanan spesifik dikarenakan peralatan bekerja pada pemakaian yang tidak teratur secara bersamaan. Pembebanan pada kapal dibagi menjadi dua yaitu :

- a. Beban kontinyu (continuous Load) generator kapal
Beban ini terdapat pada peralatan yang digunakan secara terus-menerus selama pelayaran. Contohnya lampu navigasi, pompa untuk CPP, dll.
- b. Beban generator kapal Terputus – putus (Intermittent Load)
Beban ini terdapat pada peralatan yang digunakan secara periodik selama pelayaran. Contohnya pompa transfer bahan bakar, pompa air tawar, dll.

2.2.3 Daya Reaktif Generator

Kemampuan daya reaktif generator dibatasi kemampuan penggerak utama (prime mover) terhadap nilai rating MVA generator. Sedangkan daya reaktif yang dihasilkan generator dibatasi tiga parameter, batas arus medan (*field current limit*), batas arus jangkar (*armature current limit*) dan batas pemanasan bagian ujung (*end regional heating limit*)

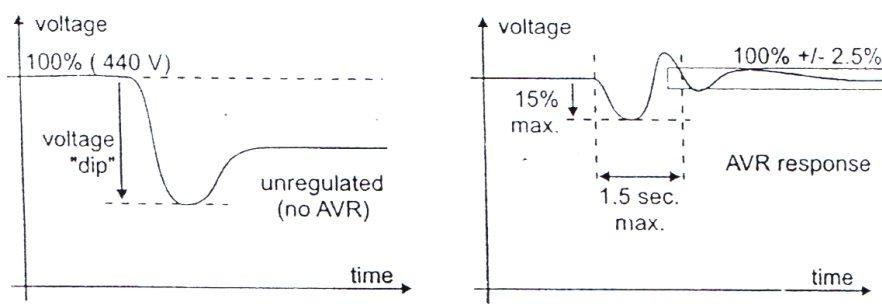
$$S = P + jQ = \bar{E}_t \bar{I}_t^* \quad (1)$$

$$= |E_t| |I_t| (\cos \phi + j \sin \phi)$$

Keterangan : S = Daya kompleks (VA)
P = Daya Aktif (W)
Q = Daya reaktif (VAR)
 E_t = Tegangan terminal generator (V)
 I_t = Arus terminal generator (A)
 ϕ = Sudut Faktor daya

2.2.4 Kendali Generator

Kendali eksitasi dilakukan oleh *automatic voltage regulator* (AVR) Tegangan terminal generator diukur dan dibandingkan dengan nilai referensi yang diinginkan. Sina error mengendalikan keluaran exciter yang merupakan tegangan medan generator utama. Selama operasi pada keadaan onstan, tegangan terminal diatur oleh sistem kendali umpan balik berpenguatan tinggi. Umumnya kesalahan tegangan dari keadaan tanpa beban hingga beban penuh kurang lebih 0.5 %. Terdapat juga perubahan tegangan terminal terkait dengan perubahan daya reaktif. Pada gambar 2.3 AVR secara otomatis akan melakukan eksitasi ketika tegangan turun maksimal sebesar 15% dan akan diseimbangkan dalam waktu 15 detik.



Gambar 2.3 Respon Voltase generator/AVR
(Sumber : Buku Pengetahuan Praktis Kelistrikan Kapal)

2.3 Stabilitas Sistem Tenaga Listrik

Stabilitas sistem tenaga listrik adalah kemampuan dari sistem untuk mendapatkan kembali kesetimbangan kondisi operasi setelah mengalami gangguan. Integritas sistem dipertahankan ketika keseluruhan sistem tenaga listrik tetap utuh tanpa pemutusan generator atau beban, kecuali untuk mengisolasi dari elemen yang mengalami gangguan atau sengaja diputuskan untuk mempertahankan kontinuitas operasi sistem.

Sistem tenaga listrik adalah sistem yang beroperasi dengan perubahan beban, keluaran generator, topologi, dan parameter operasi lain secara kontinyu. Gangguan pada sistem tenaga listrik dibagi menjadi dua, yaitu gangguan kecil dan besar. Gangguan kecil dalam bentuk perubahan beban yang terjadi secara kontinyu dan sistem akan menyesuaikan dengan perubahan kondisi. Sistem harus dapat beroperasi dibawah setiap kondisi secara ideal dan sesuai dengan permintaan beban. Sistem juga harus dapat dipertahankan dari gangguan besar seperti hubungan singkat saluran transmisi. Pengklasifikasian stabilitas sistem tenaga listrik dibagi menjadi tiga bagian, yaitu stabilitas sudut rotor, stabilitas frekuensi dan stabilitas tegangan.

2.3.1 Jaringan Distribusi Ring

Sistem rangkaian tertutup pada jaringan distribusi merupakan suatu sistem penyaluran melalui dua atau lebih saluran *feeder* yang saling berhubungan membentuk rangkaian berbentuk cincin. Sistem ini secara ekonomis menguntungkan, karena gangguan pada jaringan terbatas hanya pada saluran yang terganggu saja. Sedangkan pada saluran yang lain masih dapat menyalurkan tenaga listrik dari sumber lain dalam rangkaian yang tidak terganggu. Sehingga kontinuitas pelayanan sumber tenaga listrik dapat terjamin dengan baik. Yang perlu diperhatikan pada sistem ini apabila beban yang dilayani bertambah, maka kapasitas pelayanan untuk sistem rangkaian tertutup ini kondisinya akan semakin memburuk. Tetapi jika digunakan titik sumber (pembangkit tenaga listrik) lebih dari satu di dalam sistem jaringan ini maka sistem ini akan banyak dipakai, dan akan menghasilkan kualitas tegangan lebih baik, serta regulasi tegangannya cenderung kecil, berdasarkan referensi.

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya yaitu apabila pada titik beban terdapat dua alternatif saluran berasal lebih dari satu sumber, maka jaringan ini merupakan bentuk tertutup atau biasa disebut juga bentuk jaringan distribusi ring. Susunan rangkaian penyulang (*feeder*) membentuk ring, yang memungkinkan titik beban dilayani dari dua arah penyulang, sehingga kontinuitas pelayanan lebih terjamin, serta kualitas dayanya menjadi lebih baik, karena rugi tegangan dan rugi daya pada saluran menjadi lebih kecil, berdasarkan referensi.

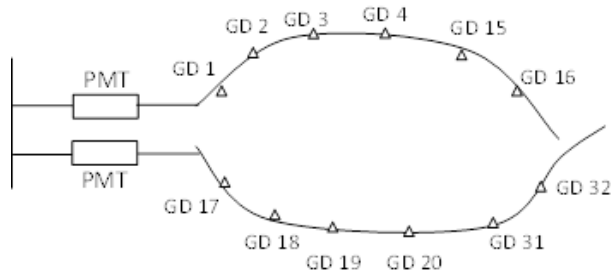
Secara umum bentuk sistem distribusi ring ini ada dua macam, yaitu:

1. *Open Loop*

Bila dilengkapi dengan *normally-open switch*, dalam keadaan normal rangkaian selalu terbuka.

2. *Close Loop*

Bila dilengkapi dengan *normally-close switch*, yang dalam keadaan normal rangkaian selalu tertutup.



Gambar 2.4 Jaringan distribusi *Loop*
(Sumber : <https://saranabelajar.wordpress.com>)

2.4 Definisi Kestabilan Transien

Dalam keadaan operasi yang stabil dari sistem tenaga listrik terdapat keseimbangan antara daya mekanis pada *prime mover* dengan daya listrik/beban listrik pada sistem. Dalam keadaan ini semua generator berputar pada kecepatan sinkron. Hal ini terjadi bila setiap kenaikan dan penurunan beban harus diikuti dengan perubahan daya *input* mekanis pada *prime mover* dari generator-generator. Bila daya *input* mekanis tidak cepat mengikuti dengan perubahan beban dan rugi-rugi sistem maka kecepatan rotor generator (frekuensi sistem) dan tegangan akan menyimpang dari keadaan normal terutama jika terjadi gangguan, maka sesaat terjadi perbedaan yang besar antara daya mekanis pada generator dan daya listrik yang dihasilkan oleh generator. Kelebihan daya mekanis terhadap daya listrik mengakibatkan percepatan pada putaran rotor generator atau sebaliknya, bila gangguan tersebut tidak dihilangkan segera maka percepatan dan perlambatan putaran rotor generator akan mengakibatkan hilangnya sinkronisasi dalam sistem, berdasarkan referensi [3].

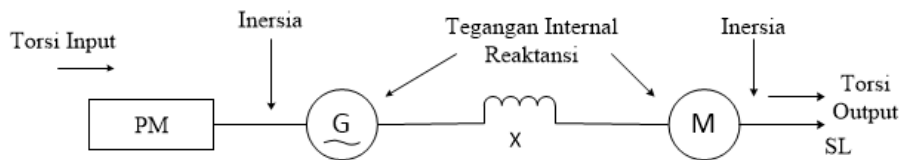
Stabilitas sistem tenaga listrik adalah suatu kemampuan sistem tenaga listrik atau bagian komponennya untuk mempertahankan sinkronisasi dan keseimbangan dalam sistem. Batas stabilitas sistem adalah daya-daya maksimum yang mengalir melalui suatu titik dalam sistem tanpa menyebabkan hilangnya stabilitas.

Berdasarkan sifat gangguan masalah stabilitas sistem tenaga listrik dibedakan atas:

1. Stabilitas tetap (*steady state*)
2. Stabilitas peralihan (*transient*)
3. Stabilitas sub peralihan (*dynamic*)

Stabilitas *steady state* adalah kemampuan suatu sistem tenaga listrik mempertahankan sinkronisasi antara mesin-mesin dalam sistem setelah mengalami gangguan kecil (fluktuasi beban). Stabilitas transien adalah kemampuan suatu sistem tenaga listrik mempertahankan sinkronisasi setelah mengalami gangguan besar yang bersifat mendadak sekitar satu ayunan atau satu *swing* pertama dengan asumsi bahwa pengatur tegangan otomatis (AVR) belum bekerja. Sedangkan stabilitas dinamis adalah bila setelah ayunan pertama (periode stabilitas transien) sistem mampu mempertahankan sinkronisasi sampai sistem dalam keadaan seimbang yang baru (stabilitas transien bila AVR dan governor bekerja cepat dan diperhitungkan dalam analisis), berdasarkan referensi.

Ketidakeimbangan antara daya pembangkit dengan beban menimbulkan suatu keadaan transien yang menyebabkan rotor dari mesin sinkron berayun karena adanya torsi yang mengakibatkan percepatan atau perlambatan pada rotor tersebut. Kehilangan sinkronisasi ini terjadi bila torsi tersebut cukup besar, maka salah satu atau lebih dari mesin sinkron tersebut akan kehilangan sinkronisasinya, misalnya terjadi ketidakeimbangan yang disebabkan adanya daya pembangkit yang berlebihan, maka sebagian besar dari energi yang berlebihan akan diubah menjadi energi kinetik yang mengakibatkan percepatan sudut rotor bertambah besar, walaupun kecepatan rotor bertambah besar, tidak berarti bahwa sinkronisasi dari mesin tersebut akan hilang, faktor yang menentukan adalah perbedaan sudut rotor atau daya tersebut diukur terhadap referensi putaran sinkronisasi. Berikut pada Gambar 2.5 merupakan gambar sistem kelistrikan secara umum mulai dari daya pembangkitan hingga ke beban listrik, berdasarkan referensi [4].



Gambar 2.5 Garis besar sistem tenaga listrik
(Sumber : Power System Stability And Control by Prabha Kundur)

Faktor-faktor utama dalam masalah stabilitas adalah:

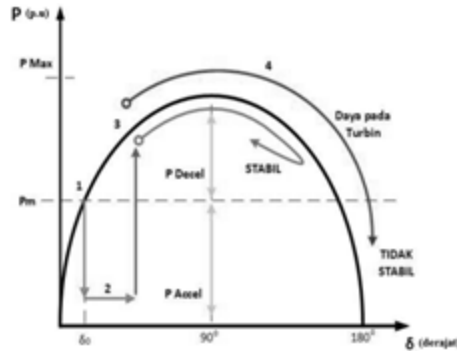
1) Faktor mekanis:

- a. Torsi input *prime* beban
- b. Inersia dari *prime mover* dan generator
- c. Inersia motor dan sumbu beban
- d. Torsi input sumbu beban

2) Torsi elektris:

- a. Tegangan internal dari generator sinkron
- b. Reaktansi sistem
- c. Tegangan internal dari motor sinkron

Gangguan besar yang terjadi pada sistem tenaga listrik mempengaruhi kinerja generator sehingga putaran rotor generator dapat mengalami fluktuasi kecepatan. Berikut pada Gambar 2.6 merupakan perilaku generator ketika sistem mengalami gangguan.



Gambar 2.6 Perilaku generator saat terjadi gangguan
(Sumber : *Power System Stability And Control by Prabha Kundur*)

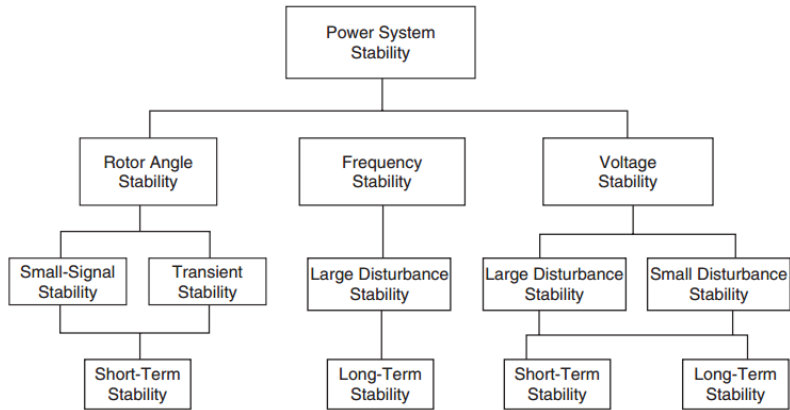
Pada titik kerja awal (sebelum terjadi gangguan), dapat diketahui bahwa timbulnya gangguan seketika mengakibatkan daya *output* generator turun secara drastis. Selisih antara daya *output* listrik tersebut dan daya mekanis turbin mengakibatkan rotor generator mengalami percepatan, sehingga sudut rotor/daya bertambah besar. Ketika gangguan hilang, daya *output* generator pulih kembali pada harga yang sesuai dengan kurva $p-\delta$ di atas.

Setelah gangguan hilang, daya *output* generator menjadi lebih besar daripada daya mekanis turbin. Hal ini mengakibatkan perlambatan pada rotor generator. Bila terdapat torsi lawan yang cukup setelah gangguan hilang untuk mengimbangi percepatan yang terjadi selama terjadinya gangguan, generator akan stabil setelah ayunan (*swing*) yang pertama dan kembali ke titik kerjanya dalam waktu kira-kira 0,5 detik. Bila kopel lawan tersebut tidak cukup besar, sudut rotor/daya akan terus bertambah besar sampai sinkronisasi dengan sistem hilang, berdasarkan referensi.

Pengaruh/penentuan stabilitas ditentukan dari beberapa faktor-faktor pendukung, antara lain, berdasarkan referensi :

1. Kapasitas kemampuan alternator, semakin besar daya mampu sistem tersebut maka sistem akan semakin stabil.
2. Sifat dan kapasitas beban, pembebanan yang melebihi kapasitas daya pembangkitan akan mempengaruhi kestabilan sistem secara keseluruhan. Pembebanan melebihi kapasitas dalam jangka waktu yang lama juga berpotensi mengganggu kestabilan yang mampu mengakibatkan kegagalan sistem.
3. Gangguan: jenis, lama, dan posisi gangguan pada kejadian gangguan satu fasa ke tanah dan gangguan sementara/temporer mempunyai kondisi kestabilan yang lebih baik dibandingkan dengan sistem yang mengalami gangguan lainnya.

Stabilitas sistem tenaga listrik menentukan keandalan sistem. Semakin tinggi stabilitas suatu sistem, maka kestabilan sistem juga semakin tinggi. Hali ini juga mempengaruhi umur peralatan pada sistem yang digunakan. Pengoperasian pada kestabilan yang baik tentu berdampak pada keekonomisan peralatan yang berarti penggantian peralatan akibat kerusakan dapat dihindari sebelum waktunya.



Gambar 2.7 Klasifikasi stabilitas sistem tenaga listrik
(Sumber : *Power System Stability And Control by Prabha Kundur*)

2.4.1 Stabilitas Sudut Rotor

Stabilitas sudut rotor adalah stabilitas yang berhubungan dengan kemampuan mesin sinkron (dalam hal ini generator) yang terkoneksi pada sistem tenaga listrik untuk tetap pada kondisi sinkron setelah mengalami gangguan. Kestabilan sudut rotor bergantung pada kemampuan untuk mengembalikan kesetimbangan antara torsi elektromagnetik dan torsi mekanik masing-masing mesin pada sistem. Ketidakstabilannya dapat menyebabkan kenaikan sudut ayunan pada generator yang berakibat kehilangan sinkronisasinya dengan generator lain. Kestabilan sudut rotor dibagi menjadi dua, yaitu stabilitas gangguan kecil (keadaan tunak) dan stabilitas keadaan transien.

2.4.2 Stabilitas Frekuensi

Stabilitas frekuensi terkait dengan kemampuan sistem tenaga listrik untuk mempertahankan frekuensi tunak dengan kisaran nominal mengikuti beberapa gangguan sistem karena ketidakseimbangan antara pembangkit dan beban. Hal ini bergantung pada pengembalian keseimbangan antara sistem beban dan pembangkitan dengan meminimalkan pelepasan/kehilangan beban.

2.4.3 Stabilitas Tegangan

Stabilitas tegangan berhubungan dengan kemampuan suatu sistem untuk mempertahankan tegangan tunak dalam seluruh rangkaian pada kondisi operasi normal setelah mengalami gangguan. Akibat dari ketidakstabilan tegangan adalah lepasnya beban pada area dimana tegangan mencapai nilai rendah yang tidak dapat diterima atau kehilangan integritas sistem tenaga listrik.

Faktor utama penyebab ketidakstabilan tegangan biasanya adalah drop tegangan yang terjadi ketika daya aktif dan daya reaktif mengalir melalui reaktansi induktif pada jaringan transmisi. Hal ini membatasi jaringan untuk mengirim daya. Transfer daya akan terbatas ketika generator mencapai batas dari maksimal daya reaktifnya. Berdasarkan rentannya waktu terjadi, stabilitas tegangan dibagi menjadi stabilitas tegangan transien (*transient voltage stability*) dan stabilitas jangka panjang (*longer-term stability*).

2.4 Standar Batas Operasi Tegangan

Biro Klasifikasi Indonesia (BKI) adalah Badan Usaha Milik Negara Indonesia yang ditunjuk sebagai satu-satunya badan klasifikasi nasional untuk melakukan pengkelasan kapal niaga berbendera Indonesia maupun asing yang secara reguler beroperasi di perairan Indonesia. Kegiatan klasifikasi BKI merupakan pengklasifikasian kapal berdasarkan konstruksi lambung, mesin dan listrik kapal dengan tujuan memberikan penilaian teknis atas layak tidaknya kapal tersebut untuk berlayar. Dalam penentuan tegangan dan frekuensi pada sistem distribusi daya, BKI memiliki standar mengenai batas tegangan operasi yang harus dipenuhi pada BKI Volume IV tentang peraturan instalasi listrik di kapal. terdapat standar pada kondisi operasi kapal untuk penggunaan distribusi sistem peralatan AC & DC seperti pada tabel 2.1 dan 2.2.

Quantity in operation	Variations	
	permanent	transient
Frequency	$\pm 5 \%$	$\pm 10 \%$ (5 sec)
Voltage	+ 6 %, - 10 %	$\pm 20 \%$ (1,5 sec)

Tabel 2.1 Standar variasi tegangan dan frekuensi sistem distribusi AC
(Sumber : BKI Vol IV)

Parameters	Variations
Voltage tolerance (continuous)	$\pm 10 \%$
Voltage cyclic variation deviation	5 %
Voltage ripple (a.c. r.m.s. over steady d.c. voltage)	10 %

Tabel 2.2 Standar variasi tegangan sistem distribusi DC
(Sumber : BKI Vol IV)

2.5 Pemodelan Electrical Transient Analysis Program

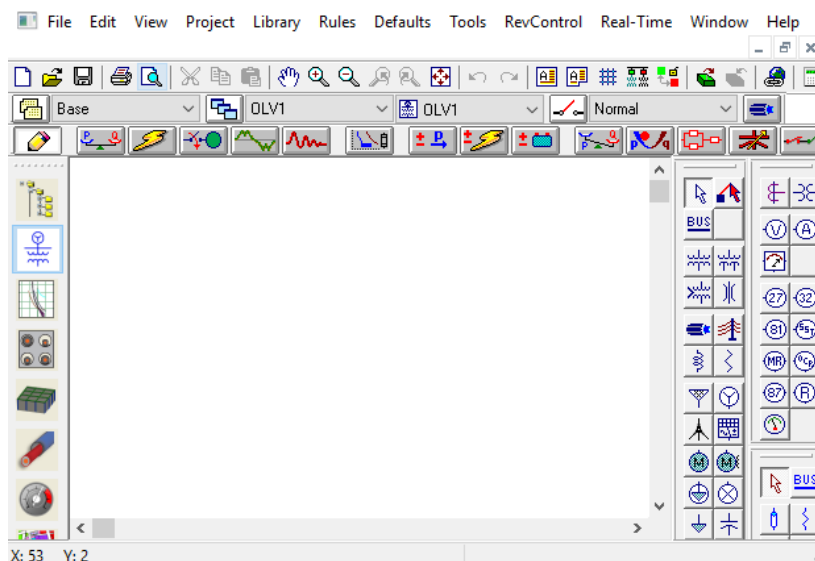
PowerStation adalah *software* untuk *power system* yang bekerja berdasarkan perencanaan (*plant/project*). Setiap *plant* menyediakan *modelling* peralatan dan alat-alat pendukung yang berhubungan dengan analisis yang akan dilakukan. Electrical Transient Analysis Program *PowerStation* dapat melakukan penggambaran *single line diagram* secara grafis dan mengadakan beberapa analisis/studi yakni *Load flow* (aliran daya), *short circuit* (hubung singkat), *motor starting*, *harmonics power systems*, *transient stability*, dan *protective device coordination*.

(Tanjung, 2010)

pengguna Electrical Transient Analysis Program dapat mendapatkan informasi mengenai kondisi sistem baik secara *offline* dengan simulasi maupun secara *online*(*real time*). Didalam simulasi software Electrical Transient Analysis Program, pengguna software tersebut dapat mensimulasikan suatu gangguan pada sistem tenaga listrik yang sebelumnya sudah dilakukannya sehingga pengguna dapat mengetahui kondisi sistem setelah terjadi gangguan dan bagaimana cara menanggulangnya. Salah satu simulasi gangguan yang digunakan pada *Electrical Transient Analysis Program* adalah analisa kestabilan kondisi transien.

Electrical Transient Analysis Program PowerStation juga menyediakan fasilitas Library yang akan mempermudah desain suatu sistem kelistrikan. Library ini dapat diedit atau dapat ditambahkan dengan informasi peralatan bila perlu. Beberapa hal yang perlu diperhatikan dalam bekerja dengan Electrical Transient Analysis Program Power Station adalah :

- a. **One Line Diagram**
menunjukkan hubungan antar komponen/peralatan listrik sehingga membentuk suatu sistem kelistrikan.
- b. **Library**
informasi mengenai semua peralatan yang akan dipakai dalam sistem kelistrikan. Data elektris maupun mekanis dari peralatan yang detail/lengkap dapat mempermudah dan memperbaiki hasil simulasi/analisa.
- c. **Standar yang dipakai**
biasanya mengacu pada standar IEC atau ANSI, frekuensi sistem dan metode – metode yang dipakai. Perbedaan anatar standart IEC dan ANSI terletak pada standart frekuensi yang digunakan yang mengakibatkan perbedaan spesifikasi peralatan yang digunakan. Jika pada standart IEC nilai frekuensi yang digunakan adalah 50Hz, sedangkan standart ANSI nilai frekuensi yang digunakan adalah 60Hz
- d. **Study Case,**
berisikan parameter – parameter yang berhubungan dengan metode studi yang akan dilakukan dan format hasil analisa.
(Firman dkk, 2016)



Gambar 2.8 Tampilan *Electrical Transient Analysis Program*

2.6 Analisa Kestabilan Kondisi Transient

Analisis Kestabilan Kondisi transient pada Electrical Transient Analysis Program digunakan untuk menginvestigasi batas stabilitas sistem tenaga pada saat sebelum, sesudah, maupun pada saat terjadi perubahan atau gangguan pada sistem. Pada simulasi stabilitas transien ini sistem dimodelkan secara dinamik, dimana kejadian gangguan yang terjadi di-set oleh user, dan penyelesaian persamaan jaringan dan persamaan diferensial mesin diselesaikan secara interaktif dalam melihat respon sistem maupun mesin dalam kawasan waktu. Dari respon tersebut, pengguna dapat menentukan kondisi transien sistem, melakukan studi stabilitas, menentukan pengaturan peralatan proteksi, dan mengaplikasikan suatu perubahan pada sistem untuk meningkatkan stabilitas. Performa dinamis sistem tenaga sangat penting dalam desain dan operasi. Studi transien dan stabilitas digunakan untuk menentukan sudut daya mesin / pergeseran kecepatan, frekuensi sistem, aliran daya aktif dan reaktif, dan level tegangan bus. Penyebab ketidakstabilan sistem antara lain :

- a. Hubung singkat
- b. Lepasnya *tie-connection utility system*
- c. Starting motor
- d. Lepasnya salah satu generator
- e. Perubahan mendadak pada pembangkitan atau beban

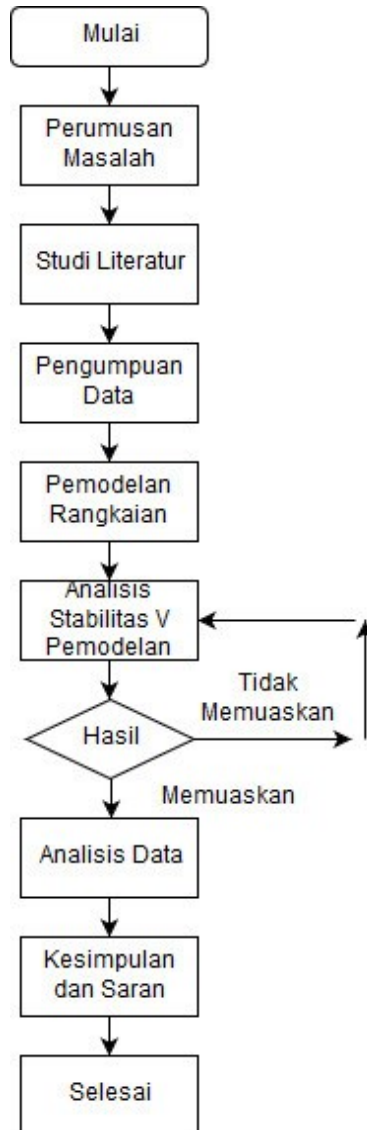
Oleh karena stabilitas sistem tenaga merupakan fenomena elektromekanis, maka mesin sinkron memegang peranan penting. Pada saat terjadi gangguan dan setelah terjadi gangguan, sudut rotor akan berosilasi dan menyebabkan osilasi aliran daya sistem. Osilasi ini dapat menjadikan ketidakstabilan pada sistem. Oleh sebab itu kestabilan sistem tenaga kadangkala dilihat dari stabilitas sudut rotor mesin sinkron.

Berbagai pengembangan yang dapat dilakukan pada sistem berdasarkan studi stabilitas :

- a. Pengubahan konfigurasi sistem
- b. Desain dan pemilihan rotating equipment : menambah momen inersia, mengurangi reaktan transien, meningkatkan kinerja voltage regulator, dan karakteristik
- c. Aplikasi *Power System Stabilizer*
- d. Peningkatan performa sistem proteksi
- e. *Load Shedding Scheme*

BAB III METODOLOGI

Metodologi penelitian adalah gambaran umum mengenai prosedur dan langkah-langkah pengerjaan suatu penelitian. Dalam metodologi penelitian ini, akan diuraikan tahapan dalam pengerjaan skripsi ini nantinya. Tahapan-tahapan tersebut dijelaskan dalam gambar 3.1 *flow chart* :



Gambar 3.1. Flowchart pengerjaan

Gambaran umum langkah – langkah pengerjaan terdapat pada gambar 3.1 seperti tertera pada *flowchart* di atas selanjutnya akan dijabarkan.

3.1 Perumusan Masalah

Perumusan masalah adalah tahap awal dalam mengerjakan skripsi. Dalam tahap ini suatu permasalahan harus dipecahkan sehingga layak untuk dijadikan bahan dalam skripsi. Dari tahap ini tujuan mengapa skripsi dikerjakan dapat diketahui. Dalam skripsi ini, penulis mengidentifikasi tentang stabilitas tegangan yang terjadi pada sistem kelistrikan di kapal.

3.2 Studi Literatur

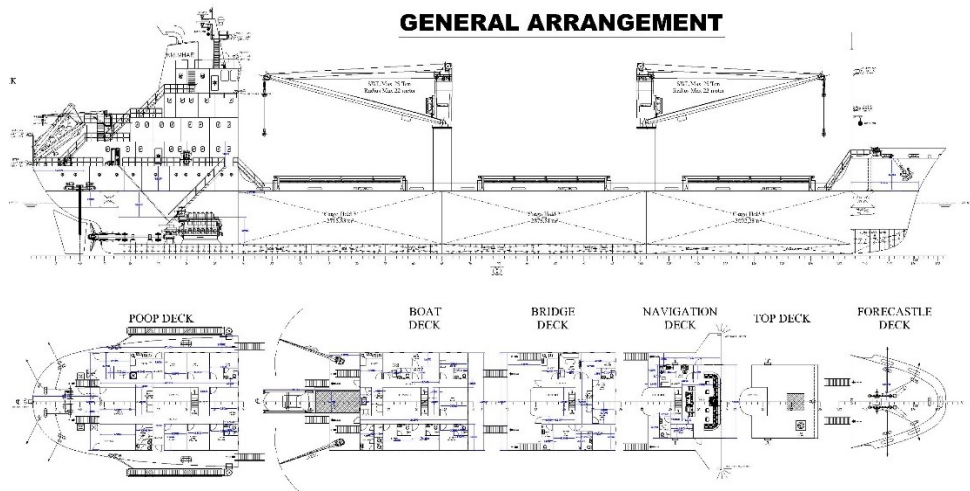
Setelah permasalahan telah diketahui, maka tahap selanjutnya adalah mencari literature. Tahap ini adalah tahap dimana yang harus dilakukan adalah mencari referensi permasalahan berikut solusi dan juga mempelajari tentang stabilitas tegangan. Tulisan – tulisan yang relevan dapat membantu penulis untuk menyelesaikan tulisan ini berupa buku, artikel yang berisi fakta dan jurnal – jurnal ilmiah. Buku, artikel yang berisi fakta dan jurnal – jurnal ilmiah diantaranya :

1. Power System Analysis
2. Power System Stability and Control
3. *Definition and Classification of Power System Stability*
4. Paper dan jurnal tentang Marine Electrical Ship.
5. Paper dan jurnal tentang Electrical Transient Analysis Program

3.3 Pengumpulan Data

Pada langkah ini penulis mengumpulkan data yang dibutuhkan untuk membantu menyelesaikan tugas akhir tersebut. Data – data yang dibutuhkan dalam penelitian ini diantaranya:

1. Data Kapal untuk analisis



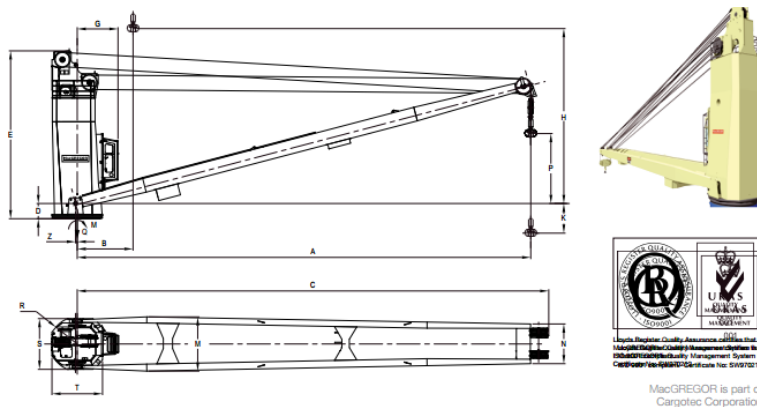
Gambar 3.2 General Arangement kapal KM. Mhar
(Sumber : Perhitungan dan Perancangan kapal KM. Mhar)

Berikut adalah data utama kapal dan Cargo Crane pada kapal KM. Mhar :

Type of ship	=	General Cargo
Tonnages (GT)	=	4857
Tonnages (NT)	=	2276
Tons (DWT)	=	-
LOA	=	108.35 m
LPP	=	103 m
B	=	17.6 m
H	=	7.7 m
D / T	=	6.5 m
Cb	=	0.697
MESIN INDUK	=	4000 BHP
RPM	=	700 Rpm
Vs	=	13.5 Knots
	=	6.9408 m/s

Crane type GL-2	Hoisting capacity SWL ton	Jib radius		Lifting height H+K m	Hoisting speed		Luffing time sec	Slewing speed rpm	Electric motor cont. kW	Starting current A	Crane power ²⁾ kW	Moment and force at the slewing ring		Weight total ⁷⁾ ton
		Max A m	Min B m		low m/min	high ¹⁾ m/min						Mmax ³⁾ kNm	Qmax ⁴⁾ kN	
GL2520	25	20	2,5	35	25	50	36	1,7	127	530	210	6200	580	34
GL2522	25	22	2,7	35	25	50	38	1,5	127	530	210	7000	600	36
GL2524	25	24	3,0	35	25	50	44	1,4	127	530	210	7800	610	37
GL2526	25	26	3,2	35	25	50	49	1,3	127	530	210	8700	630	39
GL2528	25	28	3,4	35	25	50	53	1,2	127	530	210	9500	640	40
GL2530	25	30	3,7	35	25	50	55	1,1	127	530	210	10300	660	42
GL2532	25	32	4,1	35	25	50	57	1,0	127	530	210	11200	680	44
GL3020	30	20	2,5	35	21	42	36	1,7	127	530	210	7300	640	35

Tabel 3.1 Spesifikasi Cargo Crane kapal KM. Mhar
(Sumber : Perhitungan dan Perancangan kapal KM. Mhar)



Gambar 3.3 Cargo Crane kapal KM. Mhar
(Sumber : Perhitungan dan Perancangan kapal KM. Mhar)

2. Spesifikasi generator yang dipilih kapal KM. Mhar

Power output 50 Hz

Model	kVA		kWe		Engine		Alternator	Dimensions (L x W x H) mm	Open Set		Tank (L)
	Standby*	Prime*	Standby*	Prime*	Type	Cyl Arr			Wet Weight*	(kg)	
C300 D5	300	275	240	220	QSL9G5	6L	HC4D	3135 x 1100 x 1928	2394		600
C330 D5	330	300	264	240	QSL9G5	6L	HC4D	3135 x 1100 x 1928	2394		600
C350 D5	350	315	280	252	NT855G6	6L	HC4E	3400 x 1257 x 2133	3709		800
C400 D5	390	350	312	280	NTA855G4	6L	HC4F	3400 x 1257 x 2133	3844		800

Tabel 3.2.1 Spesifikasi Generator

(Sumber : Perhitungan dan Perancangan kapal KM. Mhar)

No.	Spesifikasi	Generator ID		
		Gen1	Gen2	Gen3
1	Power Rating (Kw)	280	280	280
2	Voltage (kV)	0,38	0,38	0,38
3	Pole	4	4	4
4	frekwensi	50 hz	50 hz	50 hz
5	Load Factor	80%	80%	80%
6	Mode	<i>Droop</i>	<i>Droop</i>	<i>Droop</i>
7	Brand	<i>Cummins</i>	<i>Cummins</i>	<i>Cummins</i>

Tabel 3.2.2 Spesifikasi Generator

(Sumber : Perhitungan dan Perancangan kapal KM. Mhar)

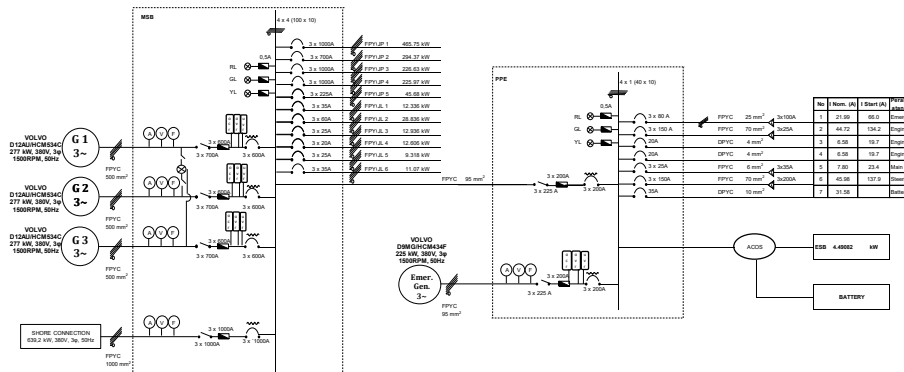
3. Data perencanaan dan hitungan peralatan sistem kelistrikan pada kapal KM. Mhar

No	Instrument	Total	Power (kW)		
			Out	Eff	In
A. Accomodation Supply Fan					
1	E/R Supply Fan	1	22.37	0.95	23.55
2	Main Deck	2	1.10	0.95	1.158
3	Poop Deck	2	1.10	0.95	1.158
4	Boat Deck	2	1.10	0.95	1.158
5	Bridge Deck	2	1.10	0.95	1.158
6	Navigation Deck	2	1.10	0.95	1.158
B. Accomodation Exhaust Blower					
7	E/R Exhaust Fan	2	1.10	0.95	1.158
8	Main Deck	2	1.10	0.95	1.158
9	Poop Deck	2	1.10	0.95	1.158
10	Boat Deck	2	1.10	0.95	1.158
11	Bridge Deck	2	1.10	0.95	1.158
12	Navigation Deck	2	1.10	0.95	1.158
13	Cen AC System	1	28.0	0.95	29.47

C. Deck Machinery					
14	Steering Gear	2	23.00	0.95	24.21
15	Windlass	2	35.0	0.95	36.84
16	Capstan	2	21.0	0.95	22.11
17	Cargo crane	2	127.0	0.95	133.7
18	Provision Crane	2	6.0	0.95	6.3
A. Engine Service					
1	HFO Transfer Pump	2	2.54	0.95	2.67
2	HFO Supply Pump	2	0.60	0.95	0.63
3	Supply Pump	2	0.85	0.95	0.89
4	Booster Pump	2	1.57	0.95	1.65
5	MDO Supply Pump	2	3.70	0.95	3.89
6	HFO Storage T.Heater	2	47.00	0.95	49.47
7	HFO Settling T.Heater	2	30.00	0.95	31.58
8	HFO Service T.Heater	2	24.00	0.95	25.26
9	HFO Preheater	2	40.00	0.95	42.11
10	MDO Preheater	1	33.00	0.95	34.74
11	HFO Separator	2	8.40	0.95	8.84
12	MDO Separator	1	9.00	0.95	9.47
13	Final Heater HFO	2	72.00	0.95	75.79
14	LO Pump (Stand by)	1	15.29	0.95	16.09
15	LO Separator unit	1	3.00	0.95	3.16
16	LO Separator Feed Pump	1	0.45	0.95	0.47
17	LO pre heater separator	1	20.00	0.95	21.05
18	SW Cooling Pump	2	15.00	0.95	15.79
21	Pre-heater	1	2.20	0.95	2.32
22	LT standby pump	1	15.00	0.95	15.79
23	HT standby pump	1	15.00	0.95	15.79
24	Air Compressor	2	3.90	0.95	4.11
B. General Service					
26	FW Hydrophore Set	1	2.20	0.95	2.32
27	SW Hydrophore Set	1	2.20	0.95	2.32
28	Oily Water Separator	1	2.50	0.95	2.63
29	Oily Bilge Pump	1	0.45	0.95	0.47
30	Ballast-Bilge pump(GS)	1	30.00	0.95	31.58
31	Ballast Pump	1	30.00	0.95	31.58
32	Bilga Pump	1	8.50	0.95	8.95
33	Fire pump	2	15.00	0.95	15.79
34	Sewage Treatment Plant	1	2.00	0.95	2.11

Tabel 3.3 Peralatan Sistem Kelistrikan Kapal
(Sumber : Perhitungan dan Perancangan kapal KM. Mhar)

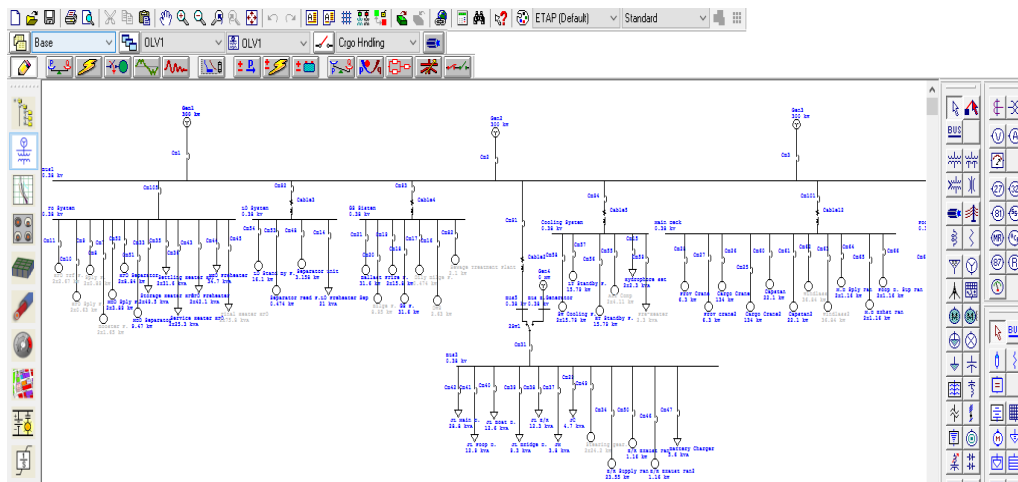
4. Rancangan Single-line diagram pada kapal General Cargo KM. Mhar



Gambar 3.4 single-line diagram
(Sumber : Perhitungan dan Perancangan kapal General Cargo KM. Mhar)

3.4 Pemodelan Rangkaian

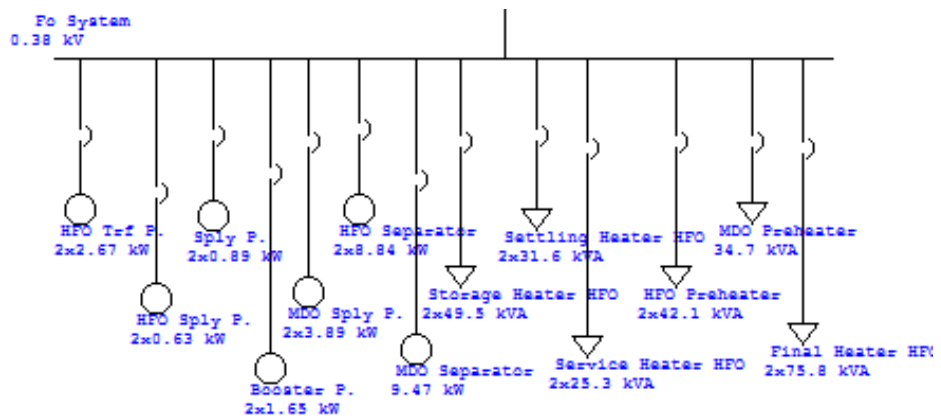
Dari pengumpulan data lalu dilakukan pemodelan rangkaian menggunakan perangkat *Electrical Transient Analysis Program*. Pemodelan dilakukan untuk merancang sistem tersebut agar bisa disimulasikan prosesnya dan bisa di *running* (dijalankan).



Gambar 3.5 Single-line Diagram pada Software

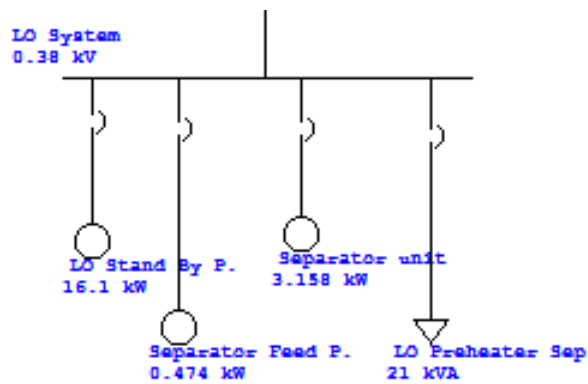
Terdapat beberapa bus cabang yang terhubung pada bus utama diantaranya :

1. Bus Fuel System



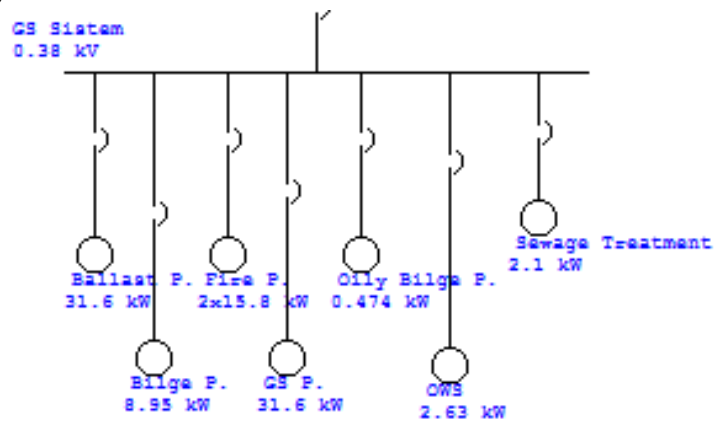
Gambar 3.6 Bus Fuel System

2. Bus Lo System



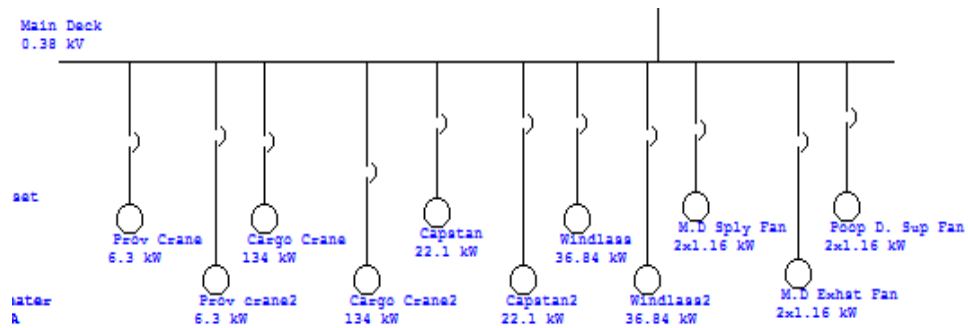
Gambar 3.7 Bus Lo System

3. Bus GS System



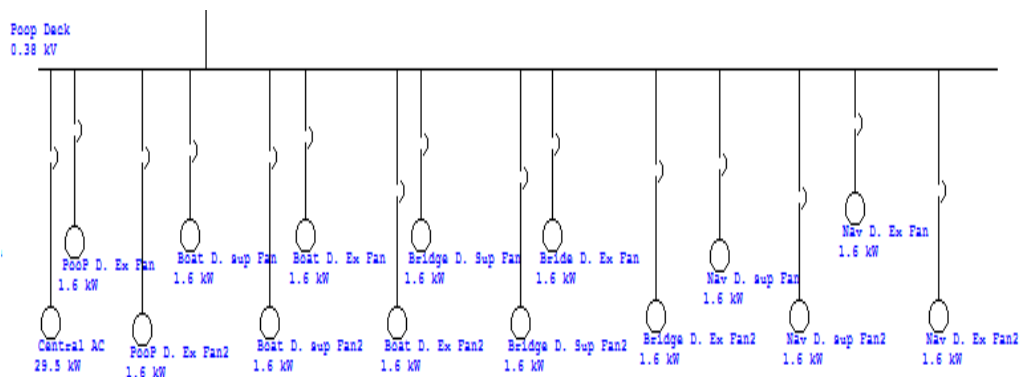
Gambar 3.8 Bus GS System

4. Bus Main Deck



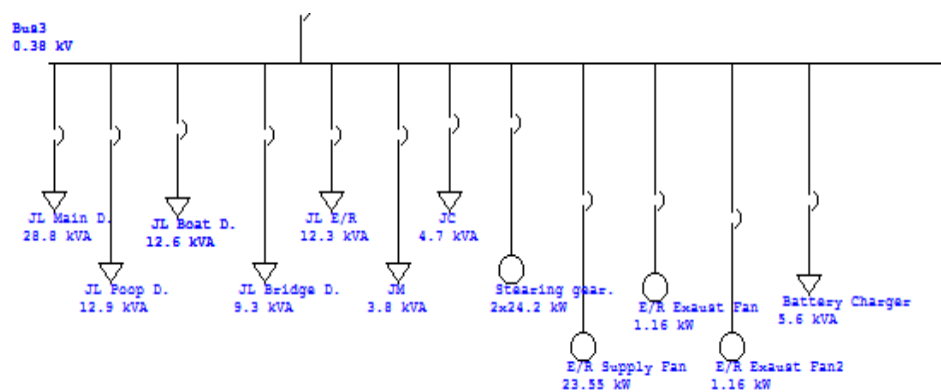
Gambar 3.9 Bus Main Deck

5. Bus Poop Deck



Gambar 3.10 Bus Poop Deck

6. Bus ESB



Gambar 3.11 Bus ESB

3.5 Analisis Stabilitas Tegangan Pemodelan dan Hasil Data

Pada tahap ini dilakukan analisis dan pembahasan terkait dari hasil output studi kasus yang sudah dilakukan. Dari hasil simulasi akan dianalisis nilai tegangan pada rangkaian untuk menilai stabilitas dari pada tegangannya. Berikut adalah tabel studi kasus yang telah direncanakan saat kapal dalam kondisi *Cargo Handling*.

No.	Studi Kasus	Keterangan
1.	Cargo Handling - 1 Gen. <i>OFF</i>	Generator3 lepas dari sistem setelah sistem berjalan 1 detik.
2.	Cargo Handling - 2 Gen. <i>OFF</i>	Generator2 dan 3 lepas dari sistem setelah sistem berjalan 1 detik.
3.	Cargo Handling - 1Gen. <i>OFF</i> + <i>Load shedding</i> (LS1)	Generator 3 lepas dari sistem kemudian dilanjutkan dengan skema pelepasan beban
4.	Cargo Handling - 1 Motor <i>Start</i> (MS1)	1 Motor Cargo Crane pada bus <i>main deck distart</i> saat 2 detik setelah sistem berjalan.
5.	Cargo Handling - 2 Motor <i>Start</i> (MS1)	2 Motor Cargo Crane pada bus <i>main deck distart</i> bersamaan saat 2 detik setelah sistem berjalan.

Tabel 3.4 Perencanaan Studi Kasus

3.6 Kesimpulan dan Saran

Langkah terakhir adalah membuat kesimpulan pada BAB V dari keseluruhan proses yang telah dilakukan sebelumnya serta memberikan jawaban atas permasalahan yang ada. Saran-saran diberikan berdasarkan hasil dari analisis yang dapat dijadikan dasar pada penelitian selanjutnya, baik terkait secara langsung pada penelitian ini ataupun pada data-data dan metodologi yang nantinya akan direferensi.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN

4.1 Gambaran Umum

Single Line Diagram kapal general cargo dimodelkan melalui *software* ETAP 12.6 dengan menggunakan data perancangan desain IV yang telah diperhitungkan. Kemudian, simulasi akan dilakukan berkaitan dengan analisis kestabilan sistem ketika mengalami gangguan-gangguan besar seperti generator lepas (*generator outage*), *starting motor*, dan gangguan hubung singkat (*short circuit*).

Sistem kelistrikan kapal general cargo secara umum menggunakan sistem interkoneksi. Sistem ini digunakan untuk meningkatkan keandalan sistem ketika sistem mengalami gangguan. Keunggulan dari sistem interkoneksi ini adalah beberapa generator dapat menyalurkan daya ke beban sehingga memungkinkan beban mendapat suplai lebih dari 1 generator. Pada Tugas Akhir ini, sistem kelistrikan kapal general cargo dikembangkan dengan menggunakan sistem distribusi ring sehingga diharapkan keandalan sistem semakin meningkat ketika sistem mengalami gangguan besar secara tiba-tiba.

kapal general cargo memiliki bus utama dan bus cabang yang akan diintegrasikan ke sistem interkoneksi dan ring. Tegangan tersebut kemudian digunakan untuk motor tegangan rendah, serta beban lampu (*lump load*), dan sebagainya

4.2 Perencanaan Studi Kasus kapal General Cargo

Pengujian sistem terhadap gangguan berfungsi untuk mengetahui respon sistem terhadap gangguan-gangguan yang mungkin terjadi. Oleh karena itu, perlu dilakukan analisis sistem dengan cara memberikan gangguan pada sistem kelistrikan. Gangguan-gangguan yang akan dilakukan antara lain adalah gangguan generator lepas, *starting motor*, dan hubung singkat.

Studi kasus yang akan dibahas pada Tugas Akhir ini secara umum adalah sebagai berikut:

1. Terjadi Generator Lepas/*Generator Outage*

Pada saat kapal mengalami perubahan misalkan dari kondisi bongkar muat ke kondisi berlayar, pada sistem kelistrikan kapal terdapat 1-2 generator yang lepas. Setelah itu respon transien sistem akan dipantau untuk mengetahui apakah sistem berjalan sesuai dengan standar yang telah ada. Respon sistem yang akan dipantau antara lain adalah respon frekuensi dan tegangan sesaat setelah sistem mengalami gangguan.

2. Terjadi *Starting Motor*

Pada kasus ini dilakukan *starting motor* ketika motor berada dalam kondisi *OFF* sesaat setelah sistem berjalan. Motor yang di-*start* adalah motor induksi yang memiliki daya paling besar pada sistem yaitu motor induksi yang terdapat

pada Crane bongkar muat. Motor induksi kemudian akan dioperasikan sesaat setelah sistem berjalan yaitu 2 detik setelah sistem mulai beroperasi. Setelah itu akan dilihat respon transien sistem ketika motor *start* diantaranya yaitu respon tegangan.

3. Terjadi Hubung Singkat/*Short Circuit*

Pada kasus hubung singkat, diasumsikan salah satu bus mengalami gangguan hubung singkat tiga fasa. Gangguan hubung singkat akan mempengaruhi kestabilan sistem secara umum. Pada kasus ini tidak dipantau untuk kasus hubungan singkat

Berikut ini pada Tabel 4.1 merupakan studi kasus yang akan dilakukan pada rangkaian listrik kapal general cargo. Pada Tabel 4.1 juga dijelaskan mengenai keterangan ketika gangguan-gangguan sistem terjadi antara lain keterangan ID peralatan yang mengalami gangguan serta respon *circuit breaker* (CB) ketika sistem mengalami gangguan.

Tabel 4.1 Studi kasus sistem pada kapal general cargo saat *Cargo handling*

No.	Studi Kasus	Keterangan
1.	Cargo Handling - 1 Gen. <i>OFF</i>	Generator3 lepas dari sistem setelah sistem berjalan 2 detik.
2.	Cargo Handling - 2 Gen. <i>OFF</i>	Generator2 dan 3 lepas dari sistem setelah sistem berjalan 2&3 detik.
3.	Cargo Handling - 1Gen. <i>OFF</i> + <i>Load shedding</i> (LS1)	Generator 3 lepas dari sistem kemudian dilanjutkan dengan skema pelepasan beban
4.	Cargo Handling - 1 Motor <i>Start</i> (MS1)	1 Motor Cargo Crane pada bus <i>main deck distart</i> saat 3 detik setelah sistem berjalan.
5.	Cargo Handling - 2 Motor <i>Start</i> (MS1)	2 Motor Cargo Crane pada bus <i>main deck distart</i> bersamaan saat 5 detik setelah sistem berjalan.

Langkah-langkah untuk mencapai kestabilan bergantung pada gangguan yang terjadi dengan memperhatikan respon frekuensi, tegangan, dan sudut rotor pada bus dan

generator yang digunakan sebagai referensi kestabilan sistem. Langkah-langkah tersebut antara lain adalah:

1. Mengamati respon frekuensi, tegangan, dan sudut rotor sistem akibat terjadi gangguan besar secara tiba-tiba.
2. Menganalisis respon tersebut apakah sesuai standar yang diizinkan serta melihat apakah sistem kembali stabil setelah terjadi gangguan.
3. Apabila sistem yang mengalami gangguan mengakibatkan kondisi sistem menjadi tidak stabil maka dilakukan pelepasan beban.

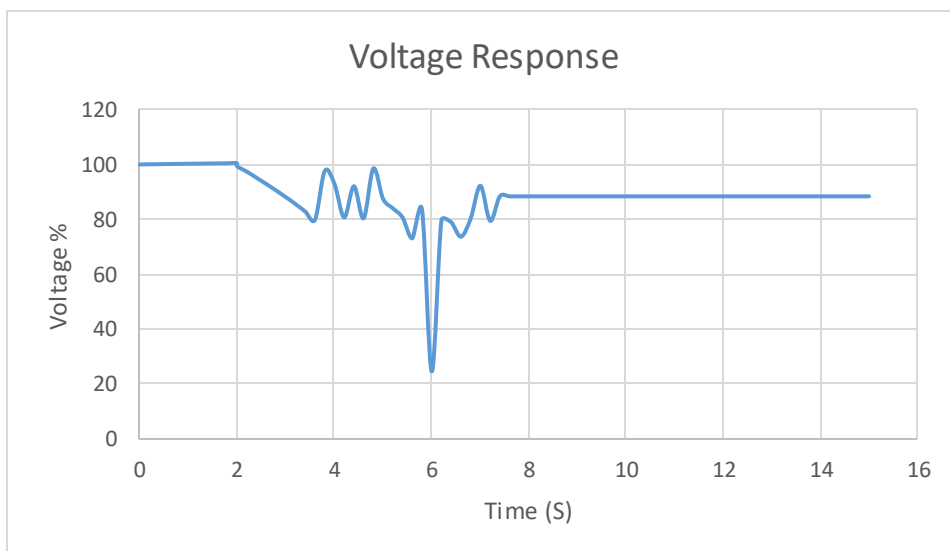
4.2 Simulasi Kestabilan Transien

Respon kestabilan suatu sistem dapat dimodelkan menggunakan *software* ETAP sehingga gangguan-gangguan yang mungkin terjadi di lapangan juga dapat dilakukan pemodelan sehingga pengujian kestabilan lebih mudah diterapkan. Simulasi kestabilan transien pada kapal general cargo dilakukan dengan membuat studi kasus pada saat kapal bongkar muat, berlayar, dan bermanuver dengan kasus antara lain lepasnya generator, *starting motor*, dan hubung singkat. Pengamatan kestabilan sistem diperoleh melalui respon tegangan sistem dengan membandingkan hasil respon tersebut.

4.3.1 Simulasi Kestabilan Transien Generator Lepas/*Generator Outage*

Pada kasus generator lepas dari sistem kelistrikan, kasus 1 diasumsikan bahwa terdapat satu generator *trip* secara tiba-tiba setelah sistem beroperasi selama 2 detik. Kasus kedua terdapat dua generator *trip* sedangkan kasus ketiga adalah mekanisme *load shedding* dari kasus yang pertama untuk mencapai kestabilan tegangan. Kapasitas daya terpasang pada generator masing-masing sebesar 280 Kw.

4.3.1.1 Cargo Handling = terjadi 1 Gen.OFF, 1 generator lepas dari sistem ($t=2s$)

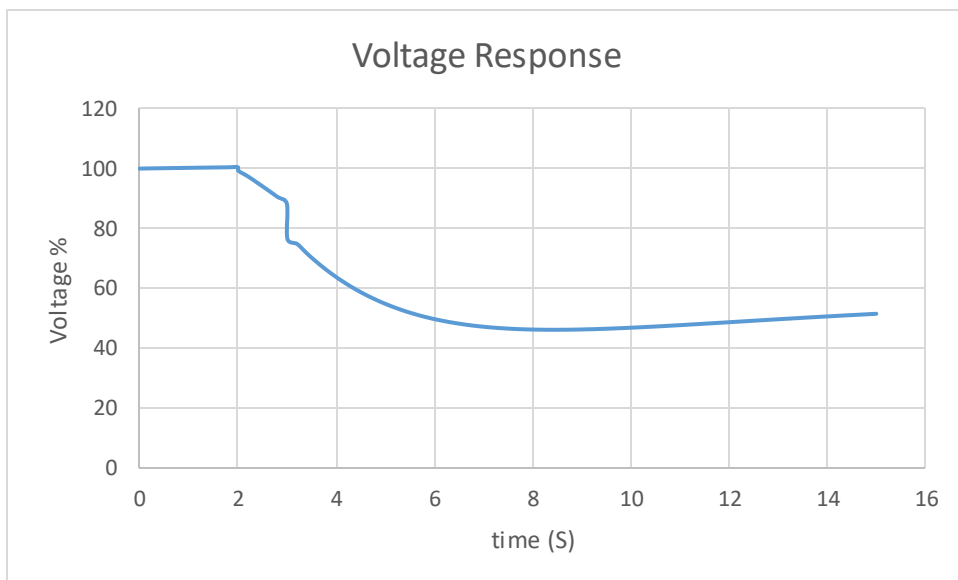


Gambar 4.1 Respon tegangan ketika generator3 lepas dari sistem.

Pada Gambar 4.1 ditunjukkan bahwa ketika sistem sedang berjalan selama 2 detik, terjadi gangguan generator3 lepas dari sistem. Hal ini mengakibatkan tegangan sistem pada bus utama mengalami penurunan. Penurunan tegangan terendah terjadi pada bus yang terhubung dengan generator secara langsung. Pada grafik terjadi transient tegangan yang menyebabkan sistem mengalami gangguan dan generator lain berusaha untuk menstabilkan tegangan. Penurunan tegangan terbesar terjadi hingga mencapai 24,45% pada detik ke-6.

Respon turunnya tegangan ini diakibatkan oleh generator sistem yang lepas sehingga beban pada sistem berupaya memperoleh arus nominal beban sedangkan jumlah beban total yang harus ditanggung sistem adalah sama. Dengan jumlah daya yang tetap dan arus yang harus disuplai menuju beban sangat besar, maka tegangan sistem akan mengalami penurunan. Pada kondisi ini berdasarkan standar tegangan, dapat disimpulkan bahwa respon tegangan sistem masih berada pada kondisi tidak aman untuk peralatan sehingga sistem sehingga perlu dilakukannya mekanisme pelepasan beban dan penggunaan *voltage relay* untuk mengantisipasi agar drop tegangan tetap pada kondisi standar yang ditentukan.

4.3.1.2 Cargo Handling = 2 Gen.OFF, 2 generator lepas dari sistem ($t=2s$ & $3s$)

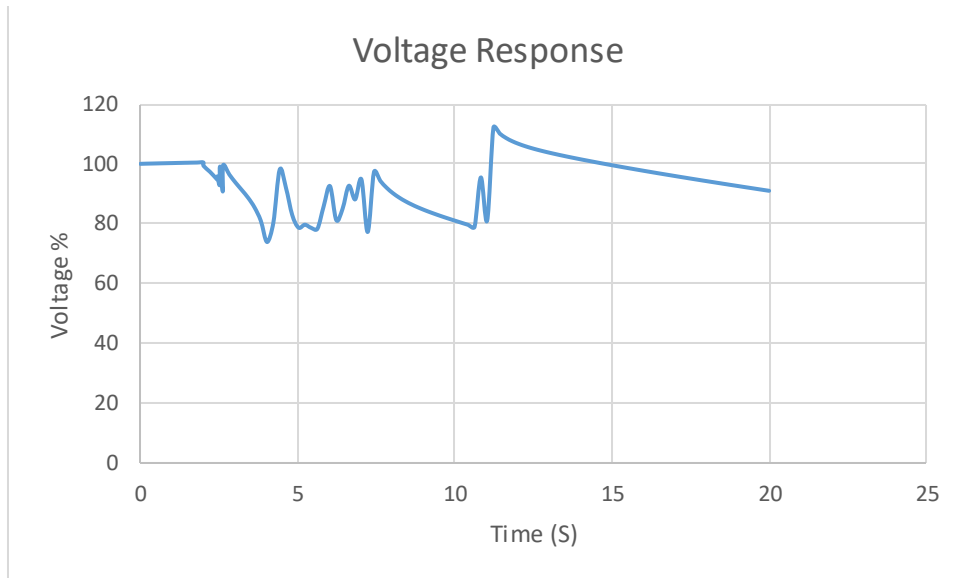


Gambar 4.2 Respon tegangan ketika generator2 dan 3 lepas dari sistem.

Pada Gambar 4.2 ditunjukkan bahwa ketika sistem sedang berjalan selama 2 detik, terjadi gangguan generator3 lepas dari sistem. Hal ini mengakibatkan tegangan sistem pada bus utama mengalami penurunan. Pada detik ke 2.8 sistem mengalami penurunan tegangan menjadi 90.4%. lalu pada detik ke 3, penurunan tegangan terjadi

sangat drastis saat generator³ lepas dari sistem. Penurunan terbesar terjadi hingga mencapai tegangan 46,06% pada detik ke 8,2. Pada kondisi ini berdasarkan standar tegangan, dapat disimpulkan bahwa respon tegangan sistem sudah tidak pada kondisi aman. Keadaan seperti ini dapat merusak sebagian besar komponen peralatan dan dianjurkan sistem tidak dapat beroperasi pada keadaan tegangan di atas.

4.3.1.3 Cargo Handling = terjadi 1 Gen.OFF + LS1 : 1 generator lepas dari sistem ($t=1s$) + load shedding 1 (LS1)



Gambar 4.3 Respon tegangan ketika generator² dan ³ lepas dari sistem.

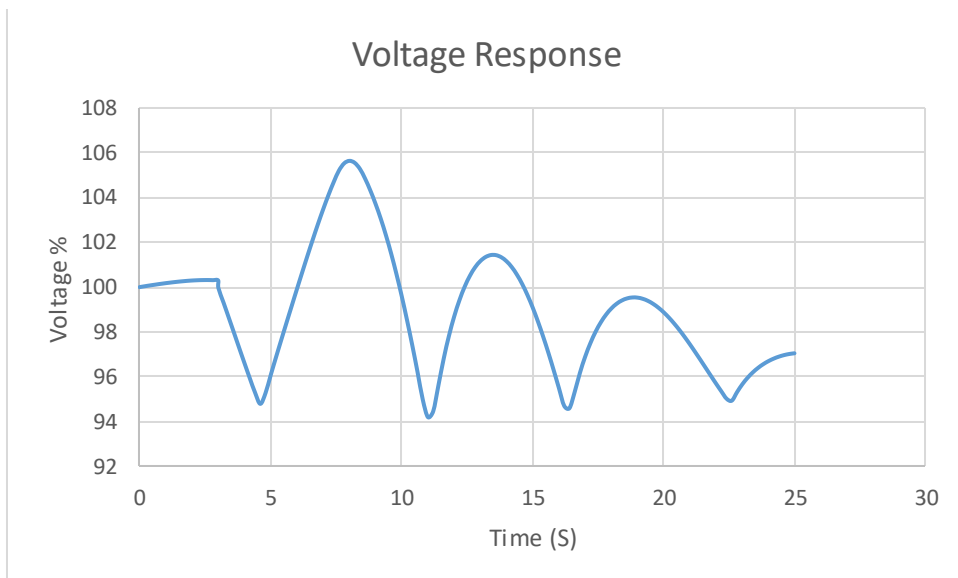
Pada Gambar 4.3 ditunjukkan bahwa ketika sistem sedang berjalan selama 2 detik, terjadi gangguan generator³ lepas dari sistem. Hal ini mengakibatkan tegangan sistem pada bus utama mengalami penurunan. Pada kasus ini adalah tindakan dari kasus yang pertama menggunakan *voltage relay* untuk mengembalikan tegangan dalam posisi stabil dengan melakukan pelepasan beban/ Load shedding. Jika dibandingkan dengan grafik pertama, penurunan tegangan tidak terlalu jatuh. sistem mengalami penurunan tegangan menjadi 73.8%. lalu pada detik ke 3 lalu sistem mengalami kenaikan tegangan menjadi 112.1%. lalu pada detik ke 11.2. Pada kondisi ini sebenarnya sistem sudah mengalami peningkatan menggunakan metode pelepasan beban dibandingkan dengan kasus pertama namun berdasarkan standar tegangan, dapat disimpulkan bahwa respon tegangan masih pada kondisi tidak aman dan perlu dilakukan analisis kembali agar tegangan tidak *overvoltage* dan *undervoltage*.

4.3.2 Simulasi Kestabilan Transien *Starting Motor*

Pada simulasi kestabilan transien *starting motor*, diasumsikan bahwa sebuah motor induksi tiga fasa yaitu *cargo crane* akan dioperasikan/dihubungkan ke sistem sesaat setelah sistem beroperasi. Motor yang dioperasikan memiliki daya yang cukup besar sehingga memiliki pengaruh terhadap kestabilan sistem yang akan dianalisis. Respon kestabilan akan dipantau melalui respon tegangan sistem kelistrikan dengan membandingkan nilai respon terhadap standar yang telah digunakan sebelumnya.

4.3.2.1 MS1 : 1 motor berputar ketika sistem beroperasi selama 3 detik ($t=3s$)

Pada kasus MS1 yaitu motor akan beroperasi ketika sistem baru beroperasi selama 3 detik. Respon tegangan, dan sudut rotor akan diamati dengan mempertimbangkan referensi standar tegangan. Motor yang akan beroperasi merupakan motor induksi tiga fasa dari *Cargo Crane1* yang memiliki kapasitas daya 134 kW. Berikut Gambar 4.3 dilihat respon tegangan sistem ketika motor di-start.

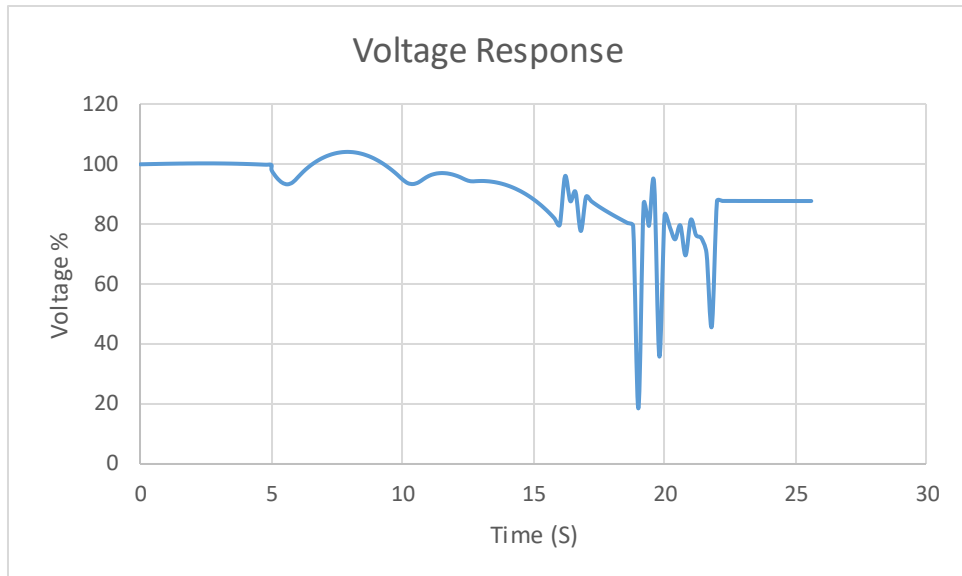


Gambar 4.4 Respon tegangan ketika motor *Cargo Crane1* Start dari sistem

Pada Gambar 4.4 dapat diketahui bahwa respon tegangan seketika mengalami transient akibat *starting motor Cargo Crane1* pada bus *Main Deck*. Penurunan tegangan diakibatkan adanya arus *start* motor dengan daya besar yang dihubungkan ke sistem. Arus yang dibutuhkan untuk *start* umumnya sebesar 6-10 kali arus nominal motor. Dengan daya yang tetap, maka melonjaknya arus *start* akan mempengaruhi tegangan sistem sesaat ketika motor mulai dihubungkan pada bus tersebut. Penurunan tegangan terendah yang terjadi akibat adanya *start* motor *Cargo Crane1* adalah 94.79% di 4,6 detik. Sedangkan kenaikan tegangan tertinggi yang terjadi adalah 105.63% di 8 detik. Berdasarkan kondisi respon tegangan tersebut, respon tegangan masih berada pada

kategori aman sehingga motor dengan daya 134 kW masih boleh beroperasi ketika sistem sedang berjalan karena *drop* tegangan yang terjadi masih berada pada rentang aman berdasarkan standar tegangan.

4.3.2.2 MS1 : 2 motor berputar ketika sistem beroperasi selama 5 detik ($t=5s$)



Gambar 4.5 Respon tegangan ketika *Cargo Crane1* dan *crane2* Start dari sistem

Pada Gambar 4.5 dapat diketahui bahwa respon tegangan seketika mengalami transient akibat *starting motor Cargo Crane1* dan *cargo crane2* pada bus *Main Deck*. Penurunan tegangan diakibatkan adanya arus *start* motor dengan daya besar yang dihubungkan ke sistem. Arus yang dibutuhkan untuk *start* umumnya sebesar 6-10 kali arus nominal motor. Dengan daya yang tetap, maka melonjaknya arus *start* akan mempengaruhi tegangan sistem sesaat ketika motor mulai dihubungkan pada bus tersebut. Penurunan tegangan terendah yang terjadi akibat adanya *start* motor *Cargo Crane1* dan *crane2* adalah 18.3% di 19,3 detik. Sedangkan kenaikan tegangan tertinggi yang terjadi adalah 104.12% di 8 detik. Sedangkan respon keadaan *steady state* pada bus setelah motor dihubungkan ke sistem yaitu terdapat pada 87,74% di 22,01 detik. Berdasarkan kondisi respon tegangan tersebut, respon tegangan masih berada pada kategori tidak aman ketika 2 cargo crane di *starting* motornya pada saat bersamaan. Sistem tidak boleh beroperasi ketika sistem sedang berjalan karena *drop* tegangan yang terjadi berada pada rentang tidak aman berdasarkan standar tegangan.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil yang diperoleh dari simulasi dan analisis pada tugas akhir ini, dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

- 1) Gangguan lepasnya generator pada kasus 1Gen.OFF dan 2Gen.OFF sebelum dilakukannya *load shedding* dari sistem, mengakibatkan kondisi kestabilan sistem berpotensi membahayakan kelistrikan kapal general cargo. Kasus tersebut menyebabkan penurunan tegangan terendah pada bus1 sebesar 24,45% pada detik ke-6 dan 46,06% pada detik ke 8,2.
- 2) Pelepasan beban/*load shedding* pada kasus 1Gen.OFF harus dilakukan untuk mempertahankan kestabilan sistem kembali pada keadaan yang diizinkan berdasarkan pada standar tegangan yang telah ditetapkan BKI.
- 3) *Starting motor 1 cargo crane* dengan daya sebesar 134 kW pada sistem kelistrikan kapal secara langsung ketika 3 generator beroperasi masih diizinkan karena nilai perubahan tegangan masih sesuai dengan nilai toleransi yang ditetapkan BKI. *Starting motor 1 cargo crane* menyebabkan penurunan respon tegangan terendah sebesar 99,7546% di 1,821 detik
- 4) *Starting motor 2 cargo crane* dengan daya sebesar 2x134 kW pada sistem kelistrikan kapal secara langsung ketika 3 generator beroperasi tidak diizinkan karena nilai perubahan tegangan mengalami drop yang sangat besar. *Starting motor 2 cargo crane* menyebabkan penurunan respon tegangan terendah sebesar 18.3% di 19,3 detik

5.2 Saran

Berdasarkan kesimpulan penelitian, maka penulis merekomendasikan berupa saran-saran sebagai berikut :

- 1) Dalam penelitian selanjutnya bisa ditekankan pada perencanaan kapal yang telah dibangun dengan meminta data kapal dan peralatan dari galangan atau biro klasifikasi.
- 2) Dalam penelitian ini studi kasus yang diambil kurang sehingga untuk penelitian selanjutnya agar dilakukan percobaan yang lebih banyak supaya datanya lebih akurat.
- 3) Dalam penelitian ini data yang diambil tidak dibandingkan antara *software* dan rumus sehingga untuk penelitian selanjutnya agar dilakukan perbandingan supaya hasilnya lebih akurat.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Saadat, Hadi, “**Power System Analysis**”, McGraw-Hill Inc., 1999.
- [2] Kundur, Prabha, “**Power System Stability and Control**”, McGraw-Hill Inc., 1994.
- [3] IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions, “**Definition and Classification of Power System Stability**”, IEEE Transactions on Power System, Vol. 19, No. 2, May 2004
- [4] BKI “**Rules For Electrical Instalations**” BKI Vol4, 2016
- [5] IMarE/IMarEST “**Practical Marine Electrical Knowledge**” ISBN:978-979-25-1963-1

Halaman ini sengaja dikosongkan

BIOGRAFI PENULIS



Penulis bernama lengkap Edo Legowo dilahirkan pada tanggal 21 Februari 1995 di Jakarta. Lahir sebagai anak kedua dari tiga bersaudara Bapak Bawadi dan Ibu Iis Kurniasih. Penulis menempuh jenjang pendidikan formal di SD Negeri 010 Jakarta, SMP Negeri 45 Jakarta, SMA Negeri 78 Jakarta. Setelah lulus SMA pada tahun 2013, melanjutkan pendidikan Program S1 sebagai mahasiswa Teknik Sistem Perkapalan ITS Surabaya dengan mengambil bidang laboratorium MEAS (Marine Electrical & Automatical System), aktif sebagai Asisten Praktikum dan menyelesaikan skripsi di laboratorium tersebut. Penulis dapat dihubungi melalui *e-mail*: edolegowo@gmail.com.